AKUSTISCHE ZEITSCHRIFT

Erstes Heft | Erster Jahrgang | September 1936

Theoretischer und experimenteller Vergleich von Hörschwellenmessungen

Von E. Waetzmann und L. Keibs

Mitteilung aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Breslau

Mit 10 Abbildungen

§ 1. Fragestellung

Die Reizschwelle der Hörempfindung ist in sehr verschiedener Weise definiert und in verschiedenen Maßen gemessen worden. Man gibt in der Regel Schwellendrucke oder Schwellenenergien an. Hieraus sind für den Vergleich der von den verschiedenen Beobachtern gewonnenen Ergebnisse große Schwierigkeiten entstanden. Nicht nur, daß sich bei der Umrechnung des Druckmaßes auf das Energiemaß und umgekehrt systematische Fehler einnisteten, es wurden und werden auch Meßwerte miteinander verglichen, die verschiedenen Definitionen der Reizschwelle zugehören und somit überhaupt nicht vergleichbar sind. So wurden die am Trommelfell gemessenen Schwellendrucke vielfach mit den Drucken verglichen, die an einer bestimmten Stelle im freien, durch den Kopf des Beobachters nicht gestörten Schallfeld vorhanden sein müssen, damit das Ohr, an diese Stelle gebracht, gerade eben reagiert. Die letztgenannten Drucke, die der M. Wienschen Definition der Schwelle entsprechen, sind aber teilweise bedeutend kleiner als die erstgenannten. In der Gegend von wenigen hundert Hertz ist der Unterschied nur gering, während in der Gegend von 600—3000 Hz die Trommelfelldrucke etwa 2—4 mal so groß sind wie die Schallfelddrucke; im Energiemaß würde das 4—16 mal so große Werte bedeuten. Wir kommen auf diese Zahlenangaben in § 3 (Abb. 1 u. 2) zurück. Ferner wurde bei der Umrechnung des am Trommelfell herrschenden Schalldruckes auf die vom Trommelfell aufgenommene sekundliche Schallenergie ein weiterer Fehler gemacht, indem allgemein die Formel zugrunde gelegt wurde, die den Zusammenhang zwischen Druck und Energie in einer rein fortschreitenden Welle angibt. Die so bestimmten Schwellenenergien sind zu groß; in der Gegend von 100 Hz um etwa das Fünfzigfache, in der Gegend von 1000 bis 2000 Hz um größenordnungsmäßig das Dreifache. Auf diese Zahlenwerte kommen wir in § 4 (Tabelle 1 u. 2) zurück. Endlich sei noch bemerkt, daß die sekundlichen Energiewerte teilweise für eine Flächengröße von 1 cm², teilweise aber für die dem Trommelfell äquivalente Kolbenmembranfläche, das ist etwa $^1/_3$ cm², angegeben wurden, wodurch ein weiterer Unsicherheitsfaktor von der Größe 3 hinzutrat.

Der eine von uns[1]) hat schon vor längerer Zeit darauf hingewiesen, daß die Unterschiede, die sich in den Ergebnissen der verschiedenen Beobachter finden, durch Überlegungen ähnlicher Art wie sie eben angedeutet wurden, wenigstens teilweise ihre Klärung finden dürften. Allerdings fehlten damals noch die theoretischen und experimentellen Voraussetzungen, um solche Überlegungen bis zu Ende durchzuführen. Heute sind diese Voraussetzungen zum großen Teil gegeben, wenigstens grundsätzlich; zahlenmäßig sind noch Lücken da, weil es noch nicht gelungen ist, alle für die Umrechnung er-

[1]) E. Waetzmann, Physik. Z. 26 (1925), S. 740.

forderlichen Größen in allen Frequenzgebieten meßtechnisch zu erfassen.

In jedem Falle dürfte einleuchtend sein, daß zunächst eine unbedingte Klarstellung der verschiedenen Definitionen und Meßmethoden erfolgen muß. Um die einzelnen Werte aufeinander umrechnen zu können, ist eine exakte formelmäßige Darstellung erforderlich. Im Anschluß hieran sind experimentelle Beobachtungen nach den verschiedenen Verfahren anzustellen, aufeinander umzurechnen und so miteinander zu vergleichen.

§ 2. Grundsätzliches zur Definition und zu den Meßverfahren

Wir können in der Hauptsache drei verschiedene Definitionen der Reizschwelle der Hörempfindung unterscheiden, denen im großen ganzen auch drei verschiedene Meßverfahren zugehören.

Die naheliegendste und anschaulichste Definition ist die folgende: Reizschwelle der Hörempfindung ist diejenige sekundliche Energie L_{Tr}, die an der Grenze der Hörempfindung vom Ohr und damit vom Trommelfell[1]) aufgenommen wird. Auf das Druckmaß übertragen würde das heißen: Reizschwelle ist derjenige Druck p_{Tr}, der am Trommelfell herrschen muß, damit eben eine Tonempfindung zustande kommt.

Man kann zweitens statt nach der vom Trommelfell wirklich aufgenommenen sekundlichen Energie L_{Tr} nach der einfallenden Energie fragen, die dem Trommelfell zugestrahlt, ihm „dargeboten" wird, und entsprechend die Reizschwelle definieren als die an der Grenze der Hörempfindung dem Trommelfell dargebotene sekundliche Energie L_e. Von dieser Energie nimmt das Trommelfell nur einen Teil auf, während es den anderen Teil reflektiert. Die Größe des aufgenommenen Anteils ist durch den Absorptionskoeffizienten a des Trommelfells bestimmt. Der der Schwellenenergie L_e entsprechende Schwellendruck p_e ist derjenige Druck, den die einfallende Welle für sich allein (also ohne die Mitwirkung des reflektierten Anteils) am Trommelfell hervorrufen würde. p_e stimmt mit p_{Tr} ebenso wie L_e mit L_{Tr} überein, wenn $a = 1$ ist.

Wir fragen drittens mit M. Wien[1]) nach dem Druck p_S, der an irgendeiner Stelle eines freien ungestörten Schallfeldes vorhanden sein muß, damit das Ohr, an diese Stelle gebracht, gerade eben eine Tonempfindung hat. Die diesem Schwellendruck entsprechende sekundliche Energie, gleich bezogen auf die „wirksame" Fläche des Trommelfells, deren Größe rund $^1/_3$ cm² ist, bezeichnen wir mit L_S. Man kann in Anlehnung an die an zweiter Stelle gegebene Definition der Reizschwelle die Wiensche Definition noch etwas anders fassen: Reizschwelle ist diejenige sekundliche Energie, die dem in den Kopf eingelagerten Ohr an der Grenze der Hörempfindung dargeboten wird. Der Zusatz „in den Kopf eingelagerten" ist wichtig, weil das Ohr nicht gut ohne Kopf in ein freies Schallfeld gebracht werden kann, weil aber andererseits durch das Einbringen des Kopfes das Schallfeld erheblich „gestört" wird. Für nicht zu lange Wellen findet Reflexion statt, wodurch der Druck vergrößert wird. Aber auch dieser vergrößerte Druck ist mit p_{Tr} noch nicht identisch. Das unter Berücksichtigung der Schallstauung am Kopf korrigierte p_S, wie es am Eingang des Gehörganges herrscht, muß zwecks Umrechnung auf p_{Tr} noch mit einem zweiten Umrechnungsfaktor multipliziert werden, der durch die Resonanzeigenschaften des Gehörganges bedingt ist.

Die Meßverfahren wollen wir in folgende drei Gruppen teilen: Das „Kammerverfahren", das von dem einen von uns[2]) neuerdings ausgearbeitete „Rohrverfahren" und endlich das „Schallfeldverfahren". Beim Kammerverfahren wird der Schallgeber fest an das Ohr des Beobachters angedrückt (Schallgeber in Ohrlage). In der zwischen dem Schallgeber und dem Ohr entstehenden Kammer bildet sich ein räumlich stationärer Druck aus, solange die Dimensionen der Kammer klein gegen die Wellenlänge sind. Mit dem Kammerverfahren wird im allge-

[1]) Die Beweise dafür, daß die vom Trommelfell aufgenommene Energie der von dem ganzen Ohr aufgenommenen praktisch gleichgesetzt werden darf, werden auf S. 5 besprochen.

[1]) M. Wien, Pflügers Arch. 97 (1903), S. 1; Ann. Physik (4), 62 (1920), S. 762.

[2]) L. Keibs, Ann. Physik (5), 26 (1936), S. 585.

meinen der wirklich am Trommelfell herrschende Druck p_{Tr} gemessen. Beim Rohrverfahren liegt der Schallgeber an dem einen Ende eines sehr langen Rohres, dessen anderes Ende mittels einer Olive in das Ohr des Beobachters eingeführt wird (Schallgeber in Rohrlage). Bei genügender Dämpfung durch die Rohrwandung wird der am Trommelfell reflektierte Teil der Energie so geschwächt, daß er nach nochmaliger Reflexion am Schallgeber den in Richtung des Trommelfells primär ablaufenden Energiestrom nicht mehr beeinflußt. Man kann also wirklich von der dem Trommelfell dargebotenen Energie sprechen. Bei der Durchführung der Messung wird der am Anfang des Rohres in unmittelbarer Nähe des Schallgebers herrschende Druck p_a bestimmt, aus dem sich p_e nach der Formel $p_e = p_a\, e^{-\beta l}$ errechnet, wo l die Rohrlänge und β die Rohrdämpfung je cm ist. Beim Schallfeldverfahren befindet sich das Ohr in einem mehr oder weniger großen Abstande von dem Schallgeber, der seine Energie frei in den Raum abstrahlt (offenes Schallfeld). Zwischen Schallgeber und Ohr findet eine wellenmäßige Schallausbreitung statt. Der Druck p_S errechnet sich aus den Betriebsdaten des Schallgebers und aus der Entfernung des Aufpunktes.

Einen Sonderfall stellt die von Hahnemann und Hecht[1]) angegebene Methode der Resonanztelephone dar. Hier wird — im Kammerverfahren — aus der dem Resonanztelephon an der Schwelle zugeführten elektrischen Energie und aus seinem akustisch-elektrischen Wirkungsgrad unmittelbar die vom Ohr aufgenommene Schwellenenergie L_{Tr} bestimmt, während die Regel ist, daß primär der Druck ermittelt und hieraus erst die Energie errechnet wird. Auf die Hahnemann-Hechtsche Methode gehen wir hier nicht weiter ein, da sie in einer gesonderten Arbeit[2]) ausführlich behandelt ist. Auch auf das Schallfeldverfahren kommen wir, wie gleich hier bemerkt sei, an anderer Stelle zurück.

Nicht nur das Energiemaß, sondern auch das Druckmaß führen zu durchaus anschaulichen Festlegungen über die Reizschwelle. Deshalb wollen wir beide Darstellungsweisen beibehalten. Dagegen werden die Ergebnisse zu unübersichtlich, wenn auch die oben eingeführten drei Unterscheidungen innerhalb jedes der beiden Maße nebeneinander bestehen bleiben. Wir werden also die p_e- und die p_S-Werte auf p_{Tr}-Werte umrechnen, um letzthin nur noch mit den p_{Tr}-Werten zu arbeiten, gleichgültig ob sie unmittelbar mit dem Kammerverfahren oder erst mittelbar mit dem Rohrverfahren oder dem Schallfeldverfahren bestimmt sind. Ebenso sind die L_e- und L_S-Werte auf L_{Tr}-Werte umzurechnen, gegebenenfalls auf dem Wege über die Drucke. Der rechnerische Übergang vom Druckmaß auf das Energiemaß ist verhältnismäßig einfach, sobald die beiden Komponenten der Trommelfellimpedanz für die verschiedenen Frequenzen bekannt sind. Als Maß für die Empfindlichkeit wählt man den reziproken Wert von L_{Tr}, also den reziproken Wert derjenigen sekundlichen Energie, die an der Grenze der Hörempfindung vom Ohr aufgenommen wird.

Unter der in diesem Zusammenhange etwas unbestimmten Bezeichnung „Ohr" ist der Gehörgang einschließlich Trommelfell und der unmittelbar an den Gehörgang grenzende Teil der Ohrmuschel zu verstehen. An Stelle von „Ohr" kann in der Definition der Schwellenenergie auch „Trommelfell" gesetzt werden. Schon Békésy[1]) hat nämlich aus Beobachtungen im Ohrenmikroskop den Schluß gezogen, daß die Wandung des Gehörganges gegenüber der Nachgiebigkeit des Trommelfells als starr zu betrachten ist. Ferner hat Geffcken[2]) durch vergleichende Impedanzmessungen an einem Ohr mit völlig verwachsenem Trommelfell und an einem sog. harten Ohr festgestellt, daß die Wände des Gehörganges praktisch nichts absorbieren. Endlich wurden jetzt noch einige Versuche angestellt, die das Ziel hatten, auch die Einflußlosigkeit der Ohrmuschel ausdrücklich zu zeigen. Auf ein Resonanztelephon, wie es in der oben erwähnten Hahnemann-Hechtschen Methode für Hörschwellenmessungen benutzt wird, konnte ein flacher Messingtrichter mit anschließender Olive, die in den Ohrkanal gut eingepaßt war, aufgesetzt werden. Nun wurden die Wirkungsgrad- und Schwellenmessungen ausgeführt, indem das Telephon einmal ohne Trichter und Olive direkt an das Ohr angedrückt, das andere Mal vermittels der Olive angeschlossen wurde. Es ergaben sich in beiden

[1]) W. Hahnemann und H. Hecht, Ann. Physik (4), 60 (1919), S. 454; ebd. (4), 63 (1920), S. 57 und 70 (1923), S. 283.

[2]) E. Waetzmann und H. Kalusche, Ann. Physik, im Druck.

[1]) G. v. Békésy, Ann. Physik (5), 14 (1932), S. 51.

[2]) W. Geffcken, Ann. Physik (5), 19 (1934), S. 843.

Fällen praktisch die gleichen L_{Tr}-Werte, woraus folgt, daß ein etwaiger Einfluß der Ohrmuschel in den sonstigen Meßfehlern verschwindet.

Neben den linearen Maßen (sekundliche Schallenergie und Schalldruck) kann noch ein logarithmisches Maß für die Hörschwellen eingeführt werden, indem die Druckunterschiede zwischen den verschiedenen Frequenzen auf Schallstärkeunterschiede — gemessen in Dezibel — umgerechnet werden. Wie der Bezugspunkt hierbei festgelegt wird, ist gleichgültig, da es ja nur auf die Unterschiede von Frequenz zu Frequenz ankommt. Es wird also in dem bekannten Ausdruck 20 lg $\frac{p}{p_0}$ für die Schallstärke der Bezugswert p_0 willkürlich und unabhängig von der Frequenz festgesetzt, beispielsweise zu 1 dyn/cm². Diesem Druckwert entspricht dann die „Schallstärke" 0 Dezibel, dem zehnfachen Druckwerte entsprechen 20 Dezibel und für Druckwerte kleiner als 1 dyn/cm² ergeben sich negative Dezibel-Werte. Mit dieser speziellen Festsetzung folgen wir einer Arbeit von SIVIAN und WHITE[1]), mit deren Ergebnissen wir uns in § 4 auseinandersetzen wollen.

§ 3. Formelmäßige Darstellung[2])

Wir geben zunächst die Formeln für die Umrechnung des Druckmaßes auf das Energiemaß. Die Schalleistung eines akustischen Verbrauchers, der den Gesetzen der Kolbenmembran gehorcht und dessen wirksame Fläche F ist, ist ganz allgemein:

$$L = F \cdot u \cdot p \cdot \cos\varphi, \tag{1}$$

wo u den Effektivwert der Geschwindigkeit der Mediumteilchen (Schallschnelle), p den Effektivwert des am Verbraucher herrschenden Schalldrucks und φ die Phasendifferenz zwischen Druck und Geschwindigkeit bedeutet. Wenn man die Impedanz für eine Fläche von 1 cm² Größe, die senkrecht zur Strahlrichtung liegt, mit $z = w + i\,q$ bezeichnet, so ist definitionsgemäß

$$u^2 = \frac{p^2}{w^2 + q^2}.$$

Berücksichtigt man ferner, daß $p \cos\varphi = w\,u$ ist, so folgt durch Einsetzen dieser Werte in (1):

$$L = F \frac{w}{w^2 + q^2} p^2. \tag{2}$$

Wählt man als Maßeinheit für die Impedanz den Schallwiderstand der Luft $c\varrho$ (c Schallgeschwindigkeit, ϱ Dichte des Mediums) und bezeichnet man die so gemessene Impedanz

$$\frac{z}{c\varrho} = \frac{w}{c\varrho} + i\,\frac{q}{c\varrho} \quad \text{mit} \quad \bar{z} = \bar{w} + i\,\bar{q},$$

so folgt:

$$L = F \frac{\bar{w}}{\bar{w}^2 + \bar{q}^2} \frac{p^2}{c\varrho} = F\,\dot{U}\,\frac{p^2}{c\varrho}. \tag{3}$$

$\dot{U}$ nennt man den Übertragungsfaktor. Er gibt das Verhältnis der von dem Verbraucher wirklich aufgenommenen zu der maximal aufnehmbaren Energie an.

Für eine rein fortschreitende Welle in Luft ist $\bar{w} = 1$ und $\bar{q} = 0$, so daß $\dot{U} = 1$ ist und die Schalleistung für diesen Fall den bekannten Wert erhält

$$L_f = F \frac{p^2}{c\varrho}. \tag{3a}$$

Das ist die Beziehung, die man früher fälschlicherweise zu benutzen pflegte, um aus den p_{Tr}-Werten die L_{Tr}-Werte zu errechnen. Für harten Abschluß, oder mit anderen Worten für eine rein stehende Welle, die bei vollständiger Reflexion an irgendeiner Ebene zustande kommt, kann für diese Ebene $\bar{w} = 0$ und $\bar{q} = \infty$ eingesetzt werden, so daß der sekundliche Energiestrom in diesem Fall den Wert erhält:

$$L_{st} = 0. \tag{3b}$$

Wenden wir Gleichung (3) auf das Trommelfell an, so erhalten wir:

$$L_{Tr} = \frac{1}{3}\,\dot{U}\,\frac{p_{Tr}^2}{c\varrho}, \tag{4}$$

wo $^1/_3$ cm² die wirksame Fläche und $\dot{U}$ der Übertragungsfaktor des Trommelfells ist.

Für die Größe des Trommelfells hat M. WIEN $^1/_3$ cm² eingesetzt, wobei wohl daran gedacht war, daß der Querschnitt des Ohrkanals an einigen Stellen etwa diesen Wert besitzt. Die Trommelfell-

[1]) L. J. SIVIAN und S. D. WHITE, Journal of the acoustical Society of America IV (1933), S. 288.

[2]) Zu den §§ 2 und 3 vgl. auch E. WAETZMANN, Festschrift der Technischen Hochschule Breslau (1935), S. 470.

fläche selbst ist ja fast 1 cm² groß. Trotzdem ist es sinnvoll, die Schalleistung auf eine Fläche von $^1/_3$ cm² zu beziehen, weil $^1/_3$ cm² ungefähr die Größe der „wirksamen" Trommelfellfläche ist, oder mit anderen Worten, die Größe der äquivalenten Kolbenmembran. Bei der Kolbenmembran, die definitionsgemäß nur Schwingungen parallel zu sich ausführen kann, ist die äußere Kraft bei gleichmäßiger Druckverteilung pF, während sie bei anderen Membranen noch mit dem sog. Flächenfaktor, etwa $^1/_3$, zu multiplizieren ist.

Für die Umrechnung der p_e- und p_S-Werte auf die L_e- und L_S-Werte ist die Beziehung (3a) zu benutzen, wobei F wieder zu $^1/_3$ cm² anzusetzen ist.

Den Zusammenhang zwischen L_{Tr} und p_e finden wir auf dem Wege über L_e. Gemäß der Definition des Absorptionskoeffizienten a ist:

$$L_{Tr} = a\, L_e \tag{5}$$

und somit unter Berücksichtigung von Gleichung (3a):

$$L_{Tr} = a\, F\, \frac{p_e^2}{c\,\varrho}\,. \tag{5a}$$

Ist der Absorptionskoeffizient $a = 1$, so heißt das, von der Gesamtenergie der auffallenden Welle wird nichts reflektiert; die Gesamtwelle ist eine rein fortschreitende Welle. Gleichung (5a) geht in Gleichung (3a) über. Ist dagegen $a = 0$, so heißt das, die gesamte auffallende Energie wird reflektiert; die Gesamtwelle ist eine rein stehende Welle. Gleichung (5a) geht in Gleichung (3b) über.

Der Absorptionskoeffizient a ist durch $\bar{w}$ und $\bar{q}$ bestimmt:

$$a = \frac{4\,\bar{w}}{(\bar{w}+1)^2 + \bar{q}^2}\,. \tag{6}$$

Durch a allein ist das akustische Verhalten des Verbrauchers aber noch nicht vollkommen charakterisiert. Neben a muß noch der bei der Reflexion an dem Verbraucher auftretende Phasensprung ϑ zwischen dem Druck der reflektierten und der einfallenden Welle gegeben sein[1]). Es ist:

$$\operatorname{tg}\vartheta = \frac{2\,\bar{q}}{\bar{w}^2 + \bar{q}^2 - 1}\,. \tag{7}$$

Den unmittelbaren Zusammenhang zwischen den p_e-Werten und den p_{Tr}-Werten erhält man durch Gleichsetzen der rechten Seiten der Gleichungen (4) und (5a). Es ergibt sich:

$$p_{Tr} = p_e \sqrt{\frac{a}{U}} = 2\,p_e \sqrt{\frac{\bar{w}^2 + \bar{q}^2}{(\bar{w}+1)^2 + \bar{q}^2}}\,, \tag{8}$$

wobei der Faktor $\sqrt{\frac{a}{U}}$ zwischen den Werten 1 (vollkommene Absorption) und 2 (vollkommene Reflexion) schwankt.

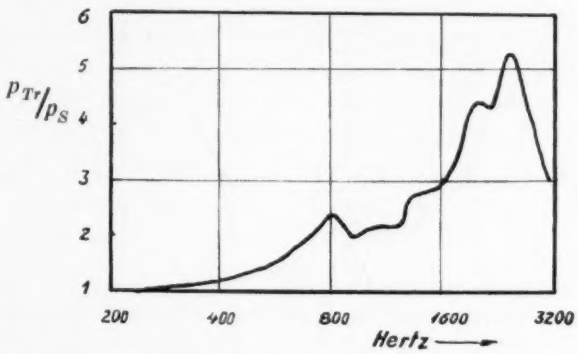

Abb. 1. Verhältnis Druck am Trommelfell zu Druck im ungestörten Schallfeld nach Békésy-Tröger

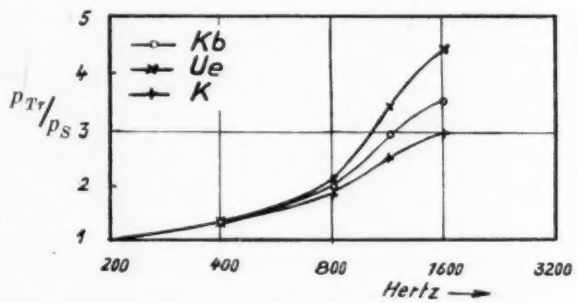

Abb. 2. Verhältnis Druck am Trommelfell zu Druck im ungestörten Schallfeld für die Versuchspersonen Kb, Ue und K

Die Umrechnung der p_S-Werte auf p_{Tr}-Werte ist bereits von Békésy[1]) durchgeführt worden. Hierbei müssen neben der Schallstauung am Kopfe des Beobachters[2]) die Resonanzerscheinungen im Gehörgang berücksichtigt werden, die ihrerseits von den Impedanzwerten des Trommelfells abhängen. Abb. 1 zeigt das Ergebnis der Békésyschen Berechnungen, wobei

[1]) Vgl. z. B. K. Schuster im Handbuch der Techn. Akustik (hrsg. von E. Waetzmann) XVII, 2 (1934), S. 1.

[1]) G. v. Békésy, a. a. O. S. 55.

[2]) B. Langenbeck, Pflügers Arch. 226 (1931), S. 11.

die Impedanzwerte einer Arbeit von TRÖGER[1]) entnommen sind. Für andere Impedanzwerte, wie wir sie an den Versuchspersonen Kb, Ue und K gemessen haben, ergaben sich ähnliche Resultate. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 zusammengestellt. Da die Impedanzmessungen am Trommelfell mit unserer Apparatur durchschnittlich nur bis 1600 Hz durchgeführt werden konnten, ließ sich die Umrechnung von p_S auf p_{Tr} nur bis zu dieser Frequenz exakt durchführen. Für die Umrechnung bei höheren Frequenzen wurden, wie gleich hier bemerkt sei, die für 1600 Hz geltenden Werte eingesetzt, um wenigstens in erster Annäherung auch hier die wirklich am Trommelfell herrschenden Drucke angeben zu können.

§ 4. Messungen von Schwellenwerten und Trommelfellimpedanzen nach dem Rohrverfahren und Vergleich mit älteren Messungen

Für die genaue Beschreibung des Verfahrens muß auf die zitierte Arbeit von L. KEIBS verwiesen werden. Als Tonquellen für die Schwellenmessungen wurden vor allem Thermophone benutzt, daneben auch ein elektrodynamisches Telephon. Gegenüber den Bedenken, die immer

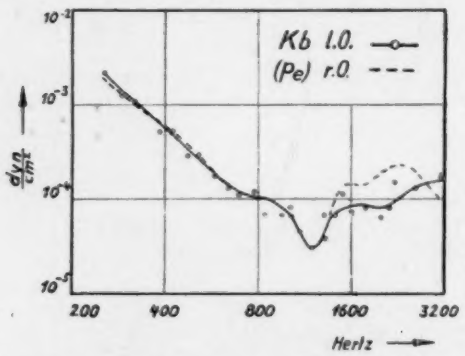

Abb. 3. Schwellendrucke der einfallenden Welle für Kb mit Thermophon als Tongeber

wieder gegen die Verwendung von Thermophonen geäußert werden, betonen wir erneut und ausdrücklich die vorzügliche Brauchbarkeit dieser Tongeber gerade für Schwellenmessungen. Die Rohrlänge wurde je nach der Frequenz (100—10000 Hz) zwischen 30 und 6 m variiert. Als Tonquelle für die Impedanzmessungen diente ein gewöhnliches elektromagnetisches Telephon. Als Druckmesser wurde das im hiesigen Institut von W. GEFFCKEN[1]) konstruierte Kompensationsmikrophon benutzt und als Kompensationsapparat der Schleifdraht-Wechselstrom-Kompensator nach GEYGER. Oberhalb 1600 Hz wurde der Abgleich so schwierig, daß die Impedanzen im Durchschnitt nur bis 1600 Hz gemessen werden konnten. Die im Rohrverfahren aus zahlreichen Einzelmessungen bestimmten mittleren Schwellendruck- und Impedanzwerte für die beiden Ohren der Versuchsperson Kb sind bereits in einer unlängst veröffentlichten Arbeit[2]) angegeben worden. Über die Messung und den Vergleich von Mittelwerten hinaus sollten aber auch Feinheiten in dem Kurvenverlauf festgestellt und auf ihre Reproduzierbarkeit geprüft werden. In den Abb. 3 und 4 sind für den Frequenzbereich von 300 bis 3200 Hz die p_e-Werte zusammengestellt, die zu verschiedenen Zeiten und mit verschiedenen Tonquellen an den beiden Ohren von Kb gefunden worden sind. Da es hier nicht auf die Absolutwerte, sondern nur auf den Vergleich ankam, konnte auf die Umrechnung der p_e-Werte auf p_{Tr}-Werte verzichtet werden. Der Übersichtlichkeit halber sind die Meßwerte nur für das eine (linke) Ohr eingezeichnet. Für die in Abb. 3 dargestellten Messungen wurde als Tonquelle ein Thermophon benutzt, für die Messungen der Abb. 4 das elektrodynamische Telephon. Die Übereinstimmung der Kurven in beiden Abbildungen ist eine recht gute, auch in den charakteristischen Einzelheiten um 1600 Hz herum. Für die gleiche Versuchsperson sind schon früher p_{Tr}-Messungen nach dem Kammerverfahren ausgeführt und veröffentlicht worden[3]). Die alten Kurven zeigen um 1600 Hz herum einen charakteristisch ähnlichen Verlauf wie die neuen, während für etwas höhere

[1]) J. TRÖGER, Physik. Z. 31 (1930), S. 26.

[1]) W. GEFFCKEN, Elektr. Nachr.-Techn. 10 (1933), S. 39.

[2]) E. WAETZMANN und L. KEIBS, Ann. Physik (5), 26 (1936), S. 141.

[3]) E. WAETZMANN, Breslauer Festschrift (1935), S. 476 (Abb. 3).

Frequenzen deutliche Abweichungen vorhanden sind. Die Abweichungen dürften mit Sicherheit darauf zurückzuführen sein, daß die Messungen nach dem Kammerverfahren von etwa 1800 Hz an durch Resonanzerscheinungen in der Druck-

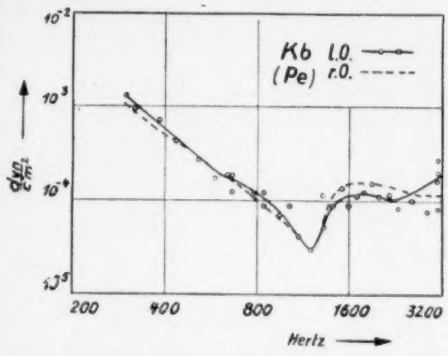

Abb. 4. Schwellendrucke der einfallenden Welle für Kb mit elektrodynamischem Telephon als Tongeber

kammer verfälscht wurden. Diese Möglichkeit ist bereits in der früheren Arbeit ausdrücklich hervorgehoben worden. In dem damaligen Zusammenhang war die Anbringung einer diesbezüglichen Korrektion, die übrigens sehr schwierig ist, nicht erforderlich. Neue Kontrollmessungen mit Thermophon in Ohrlage (Kammerverfahren) ergaben die gleichen Abweichungen. Somit darf die Reproduzierbarkeit der an der Versuchsperson Kb gefundenen Messergebnisse im ganzen genommen als eine äußerst befriedigende bezeichnet werden. Mit Hilfe der in der zitierten Abhandlung von WAETZMANN und KEIBS angegebenen w- und q-Werte für Kb sind unter Mittelbildung über beide Ohren hin nach Gleichung (4) auch die vom Trommelfell aufgenommenen Schwellenenergien (L_{Tr}) berechnet worden. Die eine Kurve der Abb. 5 zeigt das Ergebnis.

Wir wenden uns nun den Meßresultaten an der zweiten Versuchsperson (Ue) zu. Sehr ausführliche Messungen an der Versuchsperson K sollen im Rahmen einer anderen Mitteilung, die sich mit biologischen Fragen des Gehörorgans[1]) befaßt, besprochen werden. In Abb. 6 sind (analog den Abb. 3 und 4) die an der Schwelle geltenden p_e-Werte für beide Ohren von Ue zusammengestellt. Auch hier sind der Übersichtlichkeit halber die Meßwerte nur für das linke Ohr eingezeichnet. Die Messungen sind zu verschiedenen Zeiten mit drei Thermophonen und einem elektrodynamischen Telephon ausgeführt. Die Messungen sind so ausführlich mitgeteilt, um ein genaues Bild von der Größe der auftretenden Streuungen zu geben. Es dürfte einleuchtend sein, daß bei Mittelwertbildungen über eine allzu große Zahl von Einzelbeobachtungen, die zu verschiedenen Zeiten ausgeführt sind, die Feinheiten in dem Kurvenverlauf — etwa infolge verschiedener Disposition der Versuchsperson — mehr und mehr verschwinden müssen. Es kann in der Häufung von Einzelbeobachtungen des Guten auch zu viel getan werden. Aus diesem Grunde sind in Abb. 6 einige wenige — im ganzen 5 — Meßwerte absichtlich fortgelassen. Ihre Einzeichnung würde ohne ausführliche Erläuterungen über die Art ihrer Gewinnung nur irreführen. Abb. 7 enthält die aus den p_e-Kurven der Abb. 6 nach Gleichung (8) berechneten p_{Tr}-Kurven. Dazu ist (strich-punktiert) eine angenäherte Mittel-

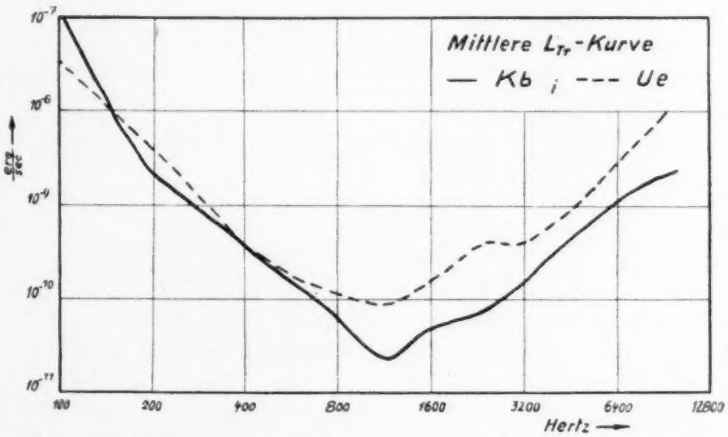

Abb. 5. Mittlere, vom Ohr aufgenommene, sekundliche Schwellenenergien für die Versuchspersonen Kb und Ue

kurve für beide Ohren eingezeichnet, aus der wiederum die in Abb. 5 mit angegebene mittlere L_{Tr}-Kurve für Ue gemäß Gleichung (4) er-

[1]) E. WAETZMANN, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-physik. Kl., N. F. 1 (1935), S. 157.

rechnet ist. Da es wichtig ist, auch über die Reproduzierbarkeit der a- und ϑ-Werte einen genauen Überblick zu erhalten, sind in den Abb. 8a, b und 9a, b zahlreiche, an verschiedenen Tagen ausgeführte Beobachtungen zu-

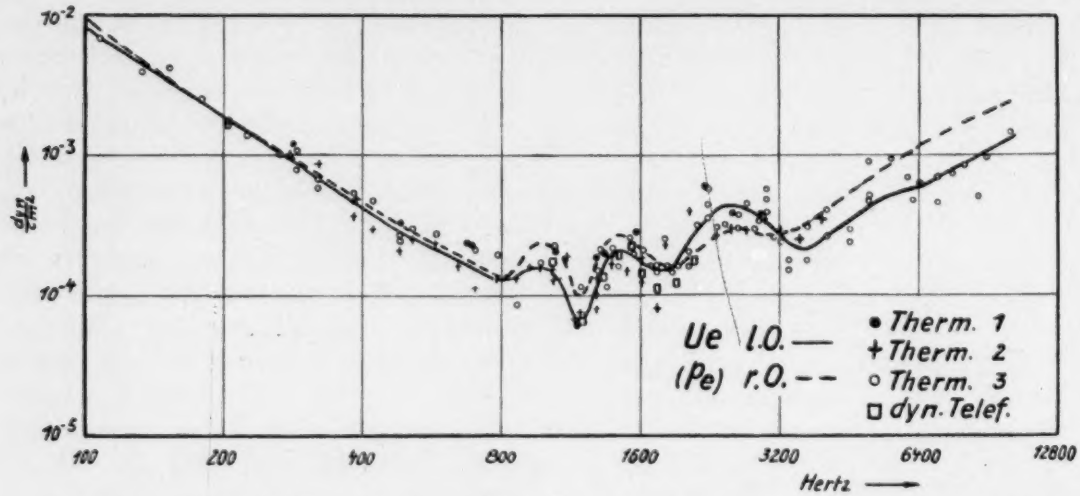

Abb. 6. Schwellendrucke der einfallenden Welle für Ue mit verschiedenen Tongebern

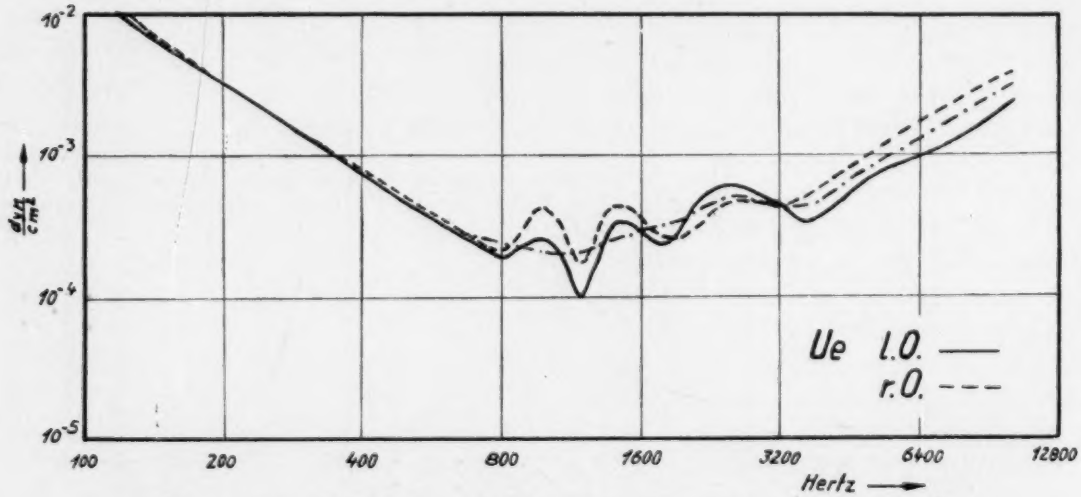

Abb. 7. Schwellendrucke am Trommelfell für die Versuchsperson Ue

sammengestellt. Besondere Erläuterungen zu diesen Kurven dürften überflüssig sein. Sehr schön tritt auch hier wieder die Ähnlichkeit zwischen linkem und rechtem Ohr der gleichen Versuchsperson hervor. Nebenbei sei bemerkt, daß unterdessen Absorptionskoeffizienten von Trommelfellen auch nach dem von K. SCHUSTER im hiesigen Institut ausgearbeiteten Verfahren („Messungen von akustischen Impedanzen durch Vergleich") gemessen worden sind[1]). Die nach den anderen Methoden an der Versuchsperson K gefundenen Werte wurden in befriedigender Weise reproduziert. In Tabelle 1 sind noch die (nach dem Rohrverfahren gemessenen) w- und q-Werte, sowie die hieraus berechneten U-Werte für die beiden Ohren von Ue angegeben[2]).

Tabelle 2 enthält die entsprechenden Werte für die Versuchsperson K.

[1]) K. SCHUSTER, Elektr. Nachr.-Techn. 13 (1936), S. 164.

[2]) In der zitierten Arbeit von E. WAETZMANN und L. KEIBS findet sich eine entsprechende Tabelle für die Versuchsperson Kb.

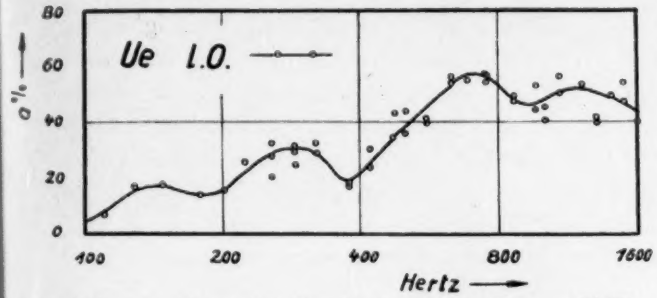

Abb. 8a. Absorptionskoeffizienten des Trommelfells der Versuchsperson Ue (l. O.)

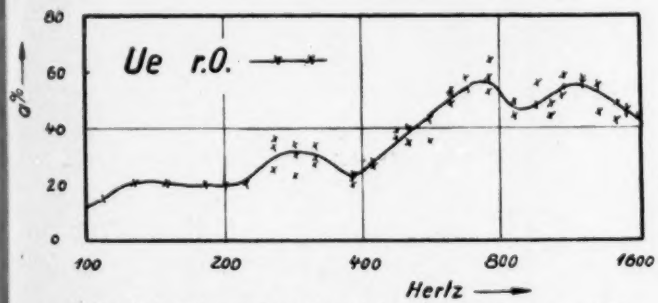

Abb. 8b. Absorptionskoeffizienten des Trommelfells der Versuchsperson Ue (r. O.)

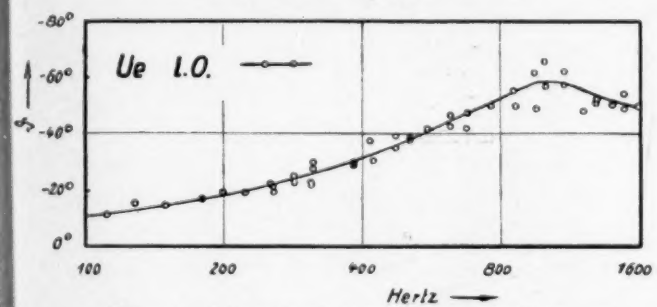

Abb. 9a. Phasensprünge am Trommelfell der Versuchsperson Ue (l. O.)

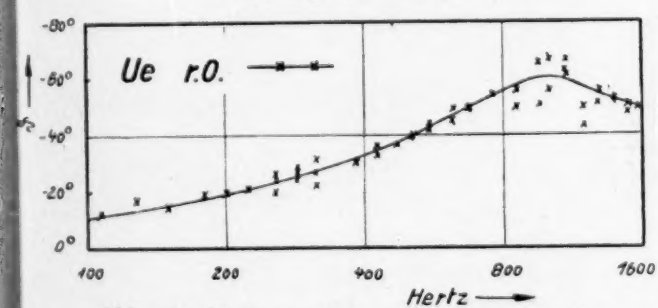

Abb. 9b. Phasensprünge am Trommelfell der Versuchsperson Ue (r. O.)

Sehr bemerkenswert ist die große Verschiedenheit der $\dot{U}$-Werte nicht nur von Frequenz zu Frequenz sondern auch für die gleiche Frequenz von Person zu Person. Es ist ohne weiteres zu übersehen, welche großen Fehlermöglichkeiten hierdurch für den Vergleich von Schwellenwerten gegeben sind.

Tabelle 1

	Linkes Ohr (Ue)			Rechtes Ohr (Ue)		
Frequenz	w	$-q$	$\dot{U}$	w	$-q$	$\dot{U}$
100	41	500	0,01	137	457	0,02
200	58	225	0,05	71	216	0,06
400	35	137	0,07	38	137	0,08
600	46	87	0,20	40	82	0,20
800	39	72	0,24	34	67	0,25
1200	33	67	0,24	34	67	0,25
1600	29	81	0,16	30	80	0,17

Trommelfellimpedanzen und Übertragungsfaktoren für die Versuchsperson Ue.

Tabelle 2.

Frequenz	Linkes Ohr (K)			Rechtes Ohr (K)		
	w	$-q$	$\dot{U}$	w	$-q$	$\dot{U}$
100	395	790	0,02	191	500	0,02
200	114	457	0,02	133	457	0,03
400	35	195	0,04	58	200	0,06
600	50	91	0,19	67	83	0,24
800	49	51	0,41	57	46	0,44
1200	37	28	0,65	48	31	0,61
1600	33	26	0,71	43	30	0,65

Trommelfellimpedanzen und Übertragungsfaktoren für die Versuchsperson K.

In Abb. 10 wird ein Vergleich der Breslauer Werte mit neueren amerikanischen Messungen einerseits[1]) und den alten Messungen von M. Wien andererseits gegeben. Von den Breslauer Werten ist die neue Mittelkurve für die beiden Ohren von Kb eingezeichnet, die nach dem Rohrverfahren gewonnen ist; in diese Kurve ordnen sich bis zu Frequenzen von etwa 1600 Hz auch die nach dem Kammerverfahren gefundenen Werte gut ein. Daneben ist die über 14 Ohren gemittelte ältere Breslauer Kurve angegeben (Kammerverfahren), die ab 1600 Hz

[1]) L. J. Sivian und S. D. White, a. a. O. S. 313. — Wenn sich nach Sivian und White die von Waetzmann-Heisig mit Resonanztelephonen gemessenen Schwellenwerte den amerikanischen Messungen recht gut einordnen, so liegt das nur daran, daß von Sivian und White zur Umrechnung der L_{Tr}- auf die p_{Tr}-Werte und damit auf Dezibel irrtümlicherweise statt der Formel (4) die Formel (3a) benutzt wird, wie das bisher üblich war. Näheres über die Resonanztelephonmessungen findet sich in der zitierten Arbeit von Waetzmann und Kalusche.

von der Kb-Kurve nach unten abweicht, weil hier, wie schon auf S. 9 erwähnt wurde, die Wellenlängen nicht mehr klein gegen die Kammerdimensionen sind. In dem Frequenzbereich von etwa 800 bis 30 Hertz sind einige ältere, sowie ganz neue Meßwerte v. BÉKÉSYS[1]) eingetragen, die durch Kreise markiert sind und sich sehr gut in die Breslauer Werte einfügen. Die WIENschen Werte sind durch Kreuze markiert. Zur Umrechnung der von WIEN bestimmten p_S-Werte auf die p_{T_T}-Werte wurden für den Frequenzbereich bis 3200 Hz die in Abb. 1 zusammengestellten Zahlen benutzt, während bei den höheren Frequenzen die für 3200 Hz geltende Zahl eingesetzt wurde. Um unmittelbaren Anschluß an die Angaben von SIVIAN und WHITE zu bekommen, sind in Abb. 10 neben den Effektivdrucken noch die relativen Schallstärken gemäß der in § 2 erwähnten Festsetzung angegeben.

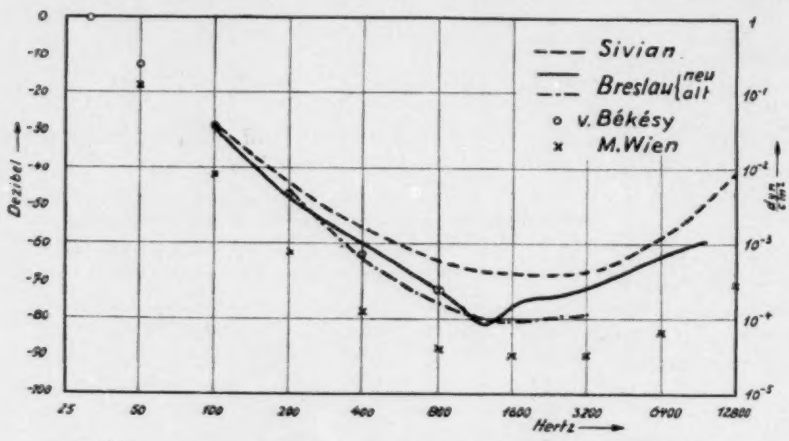

Abb. 10. Schwellenwerte verschiedener Beobachter

§ 5. Zusammenfassung

Es war bisher nicht möglich, die von verschiedenen Beobachtern bestimmten Schwellenwerte der Hörempfindung in einwandfreier Weise miteinander zu vergleichen. Es liegt dies einmal daran, daß verschiedene Definitionen und verschiedene Meßverfahren benutzt wurden, ohne daß auch nur über die Tatsache dieser Verschiedenheiten genügende Klarheit bestand. Ferner macht es — nach Ausschaltung des genannten Grundfehlers — große Schwierigkeiten, die verschiedenen Beobachtungsergebnisse aufeinander umzurechnen. Zunächst muß die Theorie der Umrechnung formelmäßig klargestellt werden; darüber hinaus müssen aber zur praktischen Durchführung der Rechnungen noch Zahlenwerte über die physikalischen Eigenschaften der untersuchten Ohren bekannt sein, deren experimentelle Bestimmung teilweise schwer durchführbar ist. Zu den genannten Unsicherheitsfaktoren kommt noch die Verschiedenheit der Versuchspersonen hinzu, und selbst für die gleiche Versuchsperson war es nicht bekannt, inwieweit Feinheiten der Meßergebnisse, namentlich über längere Zeiten hin, reproduzierbar waren. In der vorliegenden Arbeit ist der Versuch gemacht, durch Klarlegung der Definitionen, der Meßverfahren und der Umrechnungsmethoden die unbedingt notwendige Grundlage für den Vergleich von Schwellenmessungen zu schaffen. Ferner wurden nach einem neuen Verfahren (Rohrverfahren) zahlreiche Messungen über Schwellenwerte und Trommelfellimpedanzen durchgeführt und mit anderen Meßreihen (Kammerverfahren) verglichen. Hierbei wurde der Frage der Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse an der gleichen Versuchsperson besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Wir möchten annehmen, daß nunmehr dem Vergleich von Schwellenmessungen grundsätzliche Schwierigkeiten nicht mehr entgegenstehen und daß auch die von uns gefundenen Meßwerte für die Reizschwellen und Trommelfellimpedanzen als zuverlässig angesehen werden dürfen.

Der HELMHOLTZ-Gesellschaft und der Notgemeinschaft d. Deutschen Wissenschaft (Deutsche Forschungsgemeinschaft) haben wir für die Bereitstellung eines Teiles der benutzten Apparate zu danken. Ferner danken wir Herrn Dipl.-Ing. H. KALUSCHE, der nicht nur an den meisten Messungen beteiligt war, sondern uns auch bei den Rechnungen und bei der Diskussion der Ergebnisse wertvolle Hilfe geleistet hat.

(Eingegangen 3. Juli 1936)

[1]) G. v. BÉKÉSY, Ann. Physik (5), 13 (1932), S. 111; ebd. (5), 26 (1936), S. 554.

Zur Physik des Mittelohres und über das Hören bei fehlerhaftem Trommelfell

Von Georg v. Békésy

Mit 12 Abbildungen

1. Einleitung

Die grundlegenden Beobachtungen über die Funktion des Mittelohres hat H. Helmholtz in seiner berühmten Abhandlung „Mechanik der Gehörknöchelchen“[1]) niedergelegt. Erweitert wurden diese Beobachtungen durch E. Mach und J. Kessel[2]), während von O. Frank[3]) die ganze Frage der Schwingungsübertragung im Mittelohre eingehend mathematisch untersucht wurde. Die Messungen der akustischen Impedanz des Trommelfelles in dem wichtigsten Hörbereich durch J. Tröger[4]) stellen die ersten physikalisch exakten Angaben des Mittelohres dar. W. Geffcken[5]) konnte aus den Impedanzwerten die von dem Trommelfell bei den verschiedenen Frequenzen aufgenommene Schallenergie und damit den Wirkungsgrad des Ohres bis zum Trommelfell berechnen. Dahlmann[6]) hat durch Aufkleben kleiner Spiegel auf das Trommelfell und die Gehörknöchelchen am Präparat die Übertragung der Schwingungen untersucht.

Trotz dieser Fortschritte blieb es unverständlich, warum der bedeutende Aufwand von drei Gehörknöchelchen, einer Unzahl von Bändern zweier Gelenke und zweier Muskel notwendig ist, um die Schwingungen auf die Schnecke zu übertragen, wo doch vom physikalischen und fernsprechtechnischen Standpunkt aus dies ebensogut bedeutend einfacher erreicht werden kann. Unverständlich bleibt auch, wie so oft bei starken Verletzungen des Mittelohres die Hörschwelle der tieferen Töne nur so wenig verschlechtert wird.

2. Über das Hören bei fehlendem Trommelfell

Da die Hörnerven an der Basilarmembran endigen, so werden durch dessen Schwingungen die Hörempfindungen bestimmt. Wie nun die schematische Abb. 1 zeigt wird durch das Trommelfell, die Gehörknöchelchen und den Steigbügel erreicht, daß der im Gehörgang auftretende Schalldruck nur auf die eine Seite der Basilarmembran einwirkt, die über das runde Fenster dem Druck nachgeben kann, da die Luft im Mittelohr vor dem direkten Zutritt der

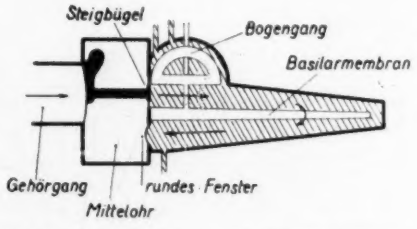

Abb. 1. Schematische Darstellung des Gehörorgans

[1]) H. Helmholtz, Pflügers Arch. 1 (1867), S. 1.
[2]) E. Mach u. J. Kessel, S.-B. Akad. Wiss. Wien, Math.-Naturwiss. Kl. 66 (1872), S. 329, u. 69 (1874), S. 221.
[3]) O. Frank, S.-B. bayer. Akad. Wiss. (1923), S. 11.
[4]) J. Tröger, Physik. Z. 31 (1930), S. 26.
[5]) W. Geffcken, Ann. Physik (5) 19 (1934), S. 829.
[6]) Dahmann, Z. Hals- usw. Heilkunde 24 (1929), S. 462 u. 27 (1930), S. 329.

Luftdruckschwankungen geschützt ist. Auf diese Weise wird für den gegebenen Schalldruck eine maximale Bewegung der Basilarmembran erzeugt.

Fehlt nun das Trommelfell, so gelangt der Schalldruck unbehindert auf den Steigbügel und das runde Fenster gleichzeitig, so daß auf die Basilarmembran nur die Druckdifferenz einwirkt. Wenn sich der Schall in der Richtung der Verbindungslinie zwischen Steigbügel und rundem Fenster frei fortpflanzen würde und dabei keine Schwächung erleidet, so ergibt sich für die Druckdifferenz

$$D = 2a \cdot \sin \pi n \frac{d}{c},$$

wenn a die Amplitude des Schalldruckes, n seine Frequenz, c die Schallgeschwindigkeit und d den Abstand zwischen Steigbügel und rundem Fenster darstellt. Der Abstand zwischen der Mitte der Steigbügelfußplatte und der Mitte des runden Fensters überschreitet selten $d = 0{,}4$ cm, so daß sich für die Frequenzabhängigkeit der Druckdifferenz folgende Werte ergeben:

Frequenz	$\sin \pi n \frac{d}{c}$	Vielfaches der normalen Hörschwelle	
		Aus der Druckdifferenz berechn.	gemessen
43000 Hz	1		
10000	0,35		
1000	$3{,}6 \cdot 10^{-2}$	$2{,}8 \cdot 10$	$1{,}6 \cdot 10^{3}$
100	$3{,}6 \cdot 10^{-3}$	$2{,}8 \cdot 10^{2}$	$1{,}1 \cdot 10^{2}$
10	$3{,}6 \cdot 10^{-4}$	$2{,}8 \cdot 10^{3}$	$0{,}9 \cdot 10$

Bei 43000 Hz ist die halbe Wellenlänge des Schalles gleich dem Abstand d, und es ist daher die Druckdifferenz doppelt so groß wie beim einseitigen Einwirken des Druckes auf den Steigbügel, d. h. bei normalem Trommelfell, wenn man davon absieht, daß durch das Trommelfell und die Gehörknöchelchen infolge der Hebelarmwirkung eine Drucktransformation erfolgt. Man kann daher annehmen, daß die in der Tabelle dargestellte Druckdifferenz, wenigstens unterhalb 1000 Hz, wo die Resonanzerscheinungen des Mittelohres nicht mehr in Betracht kommen, der Größenordnung nach richtig angibt, um wievielmal die Schwingungen des Steigbügels und damit der Basilarmembran durch das Fehlen des Trommelfelles unbedingt verkleinert werden. Denn in Wirklichkeit dürfte die Druckdifferenz noch kleiner sein, da im Mittelohr keine freie Schallausbreitung auftritt und besonders bei den tieferen Frequenzen dadurch die Phasendifferenz zwischen den beiden Fenstern noch verkleinert wird. Es kann somit, wie die zweite Kolonne in der Tabelle zeigt, bei fehlendem Trommelfell eine bis zu 1000 Hz mit der Frequenz proportional ansteigende Erhöhung der Hörschwelle gegenüber den Normalwerten angenommen werden.

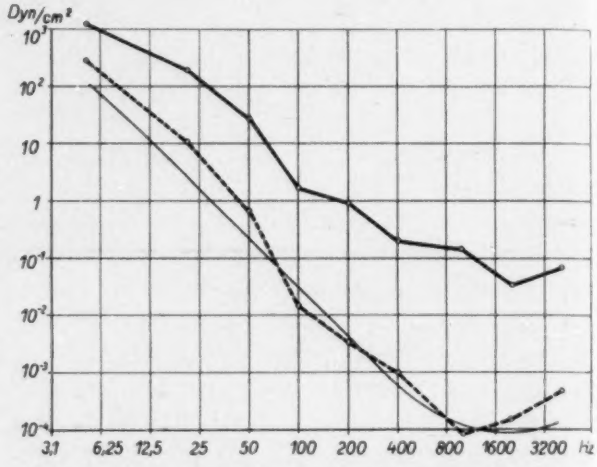

Abb. 2. Hörschwelle bei normalem und fehlendem Trommelfell

Um zu entscheiden, ob bei dem Hören ohne Trommelfell tatsächlich die Druckdifferenz zwischen dem Steigbügel und dem runden Fenster maßgebend ist, oder ob andere Erscheinungen auftreten, wurde die Hörschwelle von 5 Personen mit einseitig fehlendem Trommelfell, Hammer und Amboß und nach ärztlichem Befund sonst normalem Innenohr gemessen. In der Abb. 2 sind die erhaltenen Mittelwerte des gesunden Ohres durch die punktierte Kurve und die des fehlerhaften Ohres durch die stark ausgezogene Kurve dargestellt, während die dünne Kurve die früher bestimmte Hörkurve angibt[1]). Die Ordinate stellt dabei den Schalldruck am Trommelfell bzw. im Mittelohr dar. Es ist dabei besonders zu berücksichtigen, daß bei den höheren Frequenzen die akustische Impedanz des Gehörganges in beiden Fällen sehr verschieden sein

[1]) Ann. Physik (5) 26 (1936), S. 554.

kann, so daß die Messung der Hörschwelle mit einem Fernhörer ohne zugehörige Impedanzmessungen des Gehörganges unrichtige Werte ergeben kann. Ferner ist auf Geräuschlosigkeit des Meßraumes zu achten, da dadurch die beiden Hörschwellen ungleich stark beeinflußt werden.

Die Abb. 2, deren Werte in der letzten Kolonne der Tabelle eingetragen wurden, zeigten, daß die Hörschwellenerhöhung ungefähr proportional mit der Frequenz abnimmt, so daß beim Hören ohne Trommelfell nicht die Druckdifferenz zwischen dem Steigbügel und dem runden Fenster zur Geltung kommt, sondern andere Erscheinungen auftreten.

Anatomisch scheint es zunächst wahrscheinlich, daß bei einem gleichmäßigen Druck auf beide Fenster die Wände des Innenohres nicht als vollkommen starr aufgefaßt werden können, sondern daß durch die verschiedenen Blutgefäße beim Einwirken des Schalldruckes eine Flüssigkeitsströmung eintritt. Die Abb. 3 zeigt schematisch die Wege, über die die Flüssigkeit aus dem Innenohr entweichen kann.

Vergleicht man die Abflußmöglichkeit der Flüssigkeit auf beiden Seiten der Basilarmembran mit Berücksichtigung der Zahl der fast gleichweiten Kapillaren und ihrer in fester Knochenwand verlaufenden Länge, so scheint jedenfalls auf der Seite des Steigbügels die

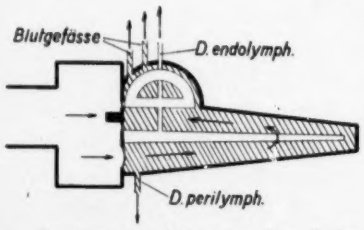

Abb. 3. Strömungsrichtung der Schneckenflüssigkeit bei fehlendem Trommelfell

Flüssigkeit viel leichter abströmen zu können, als auf der Seite des runden Fensters, da die nicht eingezeichneten Blutgefäße der Schnecke auf beiden Seiten vollkommen symmetrisch sind. Wirkt daher ein gleichartiger Druck auf beide Fenster, so tritt dabei eine Strömung der Flüssigkeit und damit eine Verschiebung der Basilarmembran ein, die gerade entgegengesetzt ist der Verschiebungsrichtung beim normalen Hören mit dem Trommelfell. Doch tritt lediglich eine Phasenumkehr der Flüssigkeitsschwingungen in der Schnecke auf, ihre Form bleibt erhalten, da sämtliche Abflußmöglichkeiten sich am Anfang der Schnecke befinden. Es bleiben daher bei einem derartigen Hören die Tonempfindungen vollkommen ungestört, nur ihre Phase wird umgekehrt.

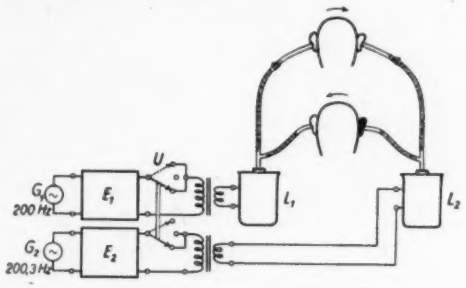

Abb. 4. Anordnung, um die Phasenumkehr der Schwingungen der Basilarmembran bei fehlendem Trommelfell nachzuweisen

Da die sinusförmigen Flüssigkeitsverschiebungen in einer Kapillare bei konstantem Druck proportional der Frequenz abnehmen, so ist nach dieser Vorstellung zu erwarten, daß die Hörschwellenerhöhung bei fehlendem Trommelfell proportional mit der Frequenz ansteigt, was mit den gemessenen Werten gut übereinstimmt.

Auch die Phasenumkehr läßt sich mit dem Richtungshören leicht zeigen. Man verwendet dazu zweckmäßig Drehtöne von etwa 200 Hz. Bei der in der Abb. 4 dargestellten Versuchsanordnung wird die Lautstärke der beiden Töne von 200 und 200,3 Hz mittels der Eichleitungen E_1 und E_2 und des Umschalters U so eingestellt, daß sie in beiden Ohren des unteren Beobachters, dessen Ohr mit fehlendem Trommelfell schwarz gezeichnet ist, gleich laut erscheint. Hierauf stellt der zweite Beobachter mit beiderseitig normaler Hörfähigkeit durch Abdrosseln des Gummischlauches ebenfalls beiderseitige Lautstärkengleichheit her. Ist dies erreicht, so bringt man den Schalter U in die unterste Lage, so daß gleichzeitig beide Töne ertönen. Man hört dann einen einzigen Ton im Kopf[1]), der entsprechend der Phasenlage der

[1]) E. M. v. Hornbostel, Psycholog. Forschung. Bd. IV, 1923, S. 64.

Schalldrucke in den beiden Ohren dauernd hin und her wandelt. Läßt man die momentane Lage des Tones mit dem Finger zeigen, so kann man gut verfolgen, daß zwischen den beiden Beobachtern eine Phasendifferenz von fast 180° besteht. Sind beide Beobachter beiderseitig normal, so bewegen beide die Finger vollkommen gleichphasig. Damit der Versuch gelingt, ist es sehr wichtig, die beiderseitige Lautstärkengleichheit sorgfältig einzustellen und vollkommen obertonfreie Töne zu verwenden. Die Einstellung der Lautstärkengleichheit gelingt leichter, wenn man für jedes Ohr einen gesonderten Lautsprecher mit Eichleitung verwendet, doch ist dann auf ihre richtige Polung besonders zu achten.

Hat man bei einseitig fehlendem Trommelfell die Phasenverschiebung des Schallbildes um 180° einwandfrei festgestellt, so kann man dem Patienten ein künstliches Trommelfell einsetzen, worauf die Phasenverschiebung des Schallbildes gegenüber dem Normalhörenden sofort verschwindet. Ist der Rand des Trommelfelles erhalten, so kann man besonders leicht einen mit Paraffinöl getränkten Wattebausch so in die Öffnung einfügen, daß diese verschlossen wird und der Wattebausch den Steigbügel berührt. Bei einem derartigen Trommelfell wird die Hörschwelle der tiefen Töne oft ganz bedeutend verbessert, während diejenige über 1000 Hz wegen der großen Masse noch schlechter wird. Doch genügt es auch, mit einem getränkten Wattebausch das runde Fenster derart zuzudecken, daß es von den Schallwellen nicht mehr getroffen wird. Wie R. BÁRÁNY[1]) gezeigt hat, tritt eine bedeutende Verbesserung der Hörschwelle ein, wenn zwischen Wattebausch und rundem Fenster noch eine Luftschicht vorhanden ist, so daß die Beweglichkeit des runden Fensters nicht gestört wird. Auch in diesen Fällen stellt sich die normale Flüssigkeitsbewegung in der Schnecke her.

Fehlen beide Trommelfelle, so tritt mit einem Normalhörenden gleichphasiges Fingerzeigen auf. Setzt man in die eine Seite ein künstliches Trommelfell ein, so erfolgt die Phasenverschiebung, die wiederum verlorengeht, wenn man auch dem anderen Ohre ein künstliches Trommelfell einsetzt.

Es ist freilich gut möglich, daß diese Phasenumkehr der Flüssigkeitsströmung in der Schnecke ausbleibt, wenn nicht nur der Gehörgang, sondern der ganze Körper den Luftdruckschwankungen ausgesetzt wird, so daß es der Flüssigkeit nicht mehr in dem Maße möglich ist, aus dem Innenohr zu entweichen. Damit wäre dann auch eine weitere Verschlechterung der Hörschwelle bei den tiefen Frequenzen verbunden.

3. Hören bei perforiertem Trommelfell

Nach Untersuchungen von E. WAETZMANN[1]) und B. LANGENBECK[2]) ist es bekannt, daß die Frequenzabhängigkeit der Hörschwelle in den

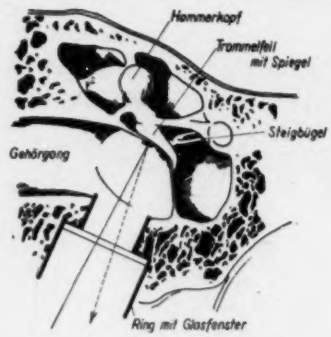

Abb. 5. Seitliche Eröffnung des Gehörganges zur Untersuchung der Schwingungen des Trommelfelles

normalen Fällen auf beiden Ohren ganz gleichartig ist. Eine mechanische Verletzung des einen Ohres erlaubt daher durch Vergleich der beiderseitigen Hörschwellen, den Einfluß der Verletzung auf die Schallübertragung festzustellen.

Es zeigten nun derartige Messungen, daß z. B. bei sonst normalen Verhältnissen ein linsenförmiger Riß im Trommelfell, der sich von der Hammerspitze bis zum Rande erstreckt und eine Breite von 2 mm besitzt, auf die Hörschwelle von 4000 bis 50 Hz herab keinen merklichen Einfluß hat, abgesehen davon, daß die kleinen

[1]) R. BÁRÁNY, Verh. dtsch. oto. Ges. (1910), S. 81.

[1]) E. WAETZMANN, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Biologie, Neue Folge 1 (1935), Nr. 10, S. 157.

[2]) B. LANGENBECK, Z. Hals- usw. Heilk. 39 (1936), S. 223.

Krümmungen in der Frequenzabhängigkeit der Hörschwelle etwas verändert werden. Unterhalb 50 Hz tritt eine leichte Verschlechterung ein, die bei 5 Hz etwa 15 db betrug.

Um diese nichterwartete Erscheinung besser untersuchen zu können, wurde zunächst versucht, vom Gehörgang aus an den Hammer des frischen Leichenohres einen kleinen Spiegel zu befestigen, ähnlich wie es W. KÖHLER[1]) mit Spiegeln von 3 mm Durchmesser am Lebenden getan hat, um durch einen reflektierten Lichtstrahl die Änderung der Schwingungsamplitude der Gehörknöchelchen bei einer Perforation des Trommelfelles zu verfolgen. Leider gelang das Aufsetzen von Spiegeln mit einer Fläche von 0,5 mm², die für die optische Registrierung schon vollkommen genügen, nur sehr schwer, da man den Neigungswinkel dieser kleinen Spiegel nicht gut einstellen kann.

Es wurde daher, wie die Abb. 5 zeigt, der Gehörgang von unten unmittelbar in der Nähe des Trommelfelles angebohrt, so daß der Spiegel meist ohne weiteres auf den Hammerstiel aufgeklebt werden konnte. Der Rand der Bohrung wurde mit Vaselin passender Konsistenz bestrichen, damit alle Öffnungen in der Knochenwand verschlossen wurden, und in die Bohrung ein Metallring mit einer aufgeklebten Glasplatte eingesetzt. Der Schall wurde mit einer kleinen Olive wie gewöhnlich dem Gehörgang zugeführt.

Um diese Eröffnung des Gehörganges auch ohne anatomische Vorkenntnisse möglichst rasch und vollkommen sicher ausführen zu können, bedient man sich eines Bohrers, dessen Anschlag so eingestellt wird, daß die Bohrerspitze in ihrer Endstellung eben eine an das Stativ des Bohrers befestigte Drahtspitze berührt. Schiebt man hierauf den Bohrer zurück und bringt die Drahtspitze in den Gehörgang an jene Stelle, wo das Bohrloch den Gehörgang eröffnen soll, so braucht man, nachdem das Präparat an dieser Stelle befestigt ist, nur den Bohrer bis zum Anschlag vorzuschieben, um die gewünschte Öffnung zu erhalten.

Bereits die in der Abb. 6 abgebildete, aus einem vorhandenen Stativ zusammengestellte provisorische Anordnung leistete in dieser Beziehung gute Dienste. Der Bohrer wird mit Hilfe des Anschlages so eingestellt, daß das etwas gekrümmte Ende des Führungsstiftes eben die Ebene des Zahnkranzes erreicht und in der Achse des Bohrers liegt. An Stelle der Drahtspitze kann man auch eine Schleife verwenden, die gerade an den Zahnkranz anliegt.

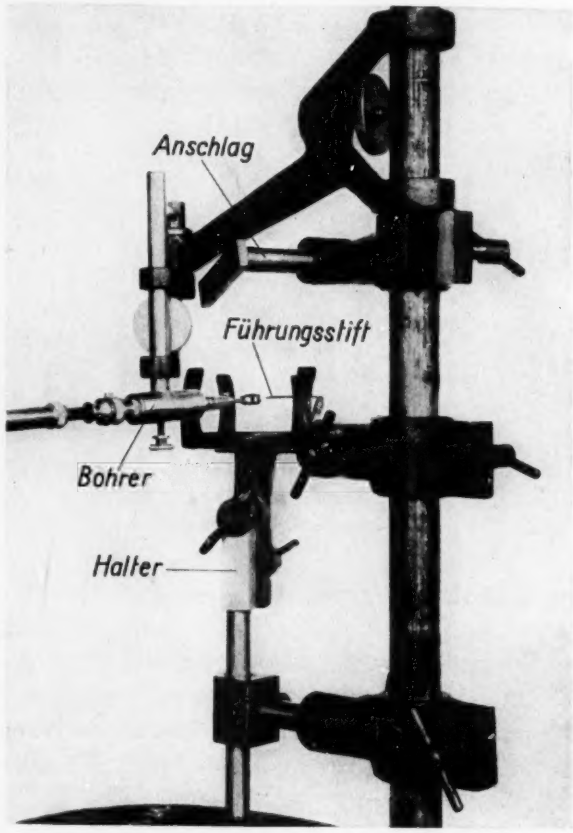

Abb. 6. Anordnung zur Eröffnung des Gehörganges und des Mittelohres

Hierauf wird der Bohrer, der um die Eisenstange des Stativs drehbar ist, zurückgeschoben und das in ein Tuch gewickelte, in dem Halter befestigte Präparat in die gewünschte Lage gebracht und festgeschraubt, worauf das Bohren erfolgt.

Will man das Mittelohr eröffnen, um die Bewegung der Gehörknöchelchen zu verfolgen, so ist es am zweckmäßigsten, in der Abb. 5 den Bohrer parallel zu sich selbst 3—5 mm nach rechts zu verschieben, so daß die Öffnung auf

[1]) W. KÖHLER, Z. Psychol. 54 (1910), S. 241.

die andere Seite des Trommelfelles zu liegen kommt, ohne daß dabei eines der vielen Bänder der Gehörknöchelchen verletzt wird. Die Versuche haben gezeigt, daß man mit dem durch das Trommelfell durchscheinenden Hammergriff als Ausgangspunkt und entsprechend geformten Enden des Führungsstiftes nach bekannten anatomischen Beschreibungen die Bohrlöcher so genau einstellen kann, daß bereits der erste Versuch gelingt. Für kleinere Löcher wurden Spiralbohrer verwandt, für diejenigen von 3—7 mm Durchmesser dagegen Stahlrohre mit einem Zahnkranz, wobei die Wandstärke

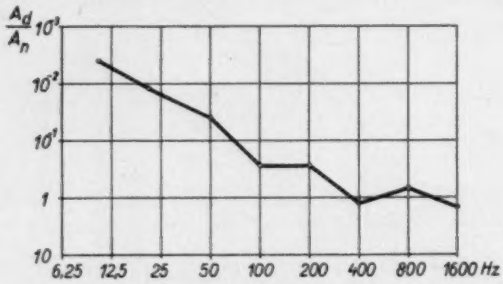

Abb. 7. Die Änderung der Schwingungsamplitude der Gehörknöchelchen bei einer Durchlöcherung des Trommelfelles

möglichst dünn gewählt wurde, damit die Druckkräfte während des Bohrens klein bleiben.

Verfolgt man die akustische Impedanz des Trommelfelles nach dem Ableben, so steigt diese dauernd an und erreicht oft nach einigen Tagen den fünf- bis zehnfachen Normalwert. Da diese Zunahme der Impedanz hauptsächlich durch das Austrocknen des Trommelfelles beim Aussetzen des Blutstromes entsteht, so arbeitet man zweckmäßig in Feuchtigkeitskammern und verschließt jede Bohröffnung möglichst rasch mit dem Glasfenster.

An einem ganz frischen Präparate wurde die Frequenzabhängigkeit der Schwingungsamplitude des Hammerstieles bei einem gegebenen Schalldruck im Gehörgang gemessen, hierauf am unteren Teile des Trommelfelles eine Öffnung von 1 mm² angebracht und die Messung wiederholt. Die Frequenzabhängigkeit des Verhältnisses der beiden Schwingungsamplituden ist in der Abb. 7 dargestellt. Wie ersichtlich tritt in dem ganzen höheren Tonbereich bis zu 100 Hz hinab durch die Öffnung im Trommelfell keine nennenswerte Verschlechterung des Hörvermögens ein.

Die Verkleinerung der Schwingungen des Steigbügels hängt außer von der Größe der Öffnung ab vom Volumen des Mittelohres und von der Nachgiebigkeit des Trommelfelles. Mit Hilfe der akustischen Impedanzbrücke wurde bei 10 Hz das Volumen des Mittelohres am Präparat bestimmt, wobei sich für Männer im Mittel 2,0 cm³ ergab. Auch an den Personen mit fehlendem Trommelfell wurden diese Messungen ausgeführt und ergaben den gleichen Mittelwert, wobei die beiden Extremwerte 1,2 und 3,5 cm³ betrugen. Der von den Gehörknöchelchen eingenommene Teil des Mittelohrvolumens beträgt etwa 0,5—0,8 cm³. Die weitere Vergrößerung des Volumens entsteht dadurch, daß dieser Teil mit den Poren der umgebenden Knochenwand, insbesondere des sog. Warzenfortsatzes verbunden ist. Die Poren der Knochenwand, in der Abb. 5 schematisch dargestellt, sind ihrer Größe nach bei den verschiedenen Personen sehr verschieden, oft jedoch von einer solchen Feinheit, daß man fast sagen würde, daß ein Teil des Mittelohres mit einem Absorptionsstoff ausgekleidet ist, was jedenfalls die Resonanzen im Mittelohr vermindert.

Vergleicht man die akustische Impedanz des Mittelohrvolumens von 2,0 cm³ mit der bei tiefen Frequenzen gemessenen Impedanz des Trommelfelles am Lebenden, so zeigt sich, daß die Trommelfellimpedanz im wesentlichen ebenfalls einem Volumen von 2,0 cm³[1]) gleichkommt, wenn man von dem kleinen Verlustwinkel absieht. Daraus folgt, daß die vom Gehörgang aus gemessene Impedanz des Trommelfelles nicht durch die elastischen Eigenschaften der Membran allein bestimmt wird, sondern wesentlich durch das Luftpolster im Mittelohr beeinflußt ist. Da die Membran des Trommelfelles im Vergleich zu den elastischen Kräften des Mittelohrvolumens sehr nachgiebig ist, so wird auch verständlich, wieso dessen Perforation einen so kleinen Einfluß auf die Schwingungsamplitude ausübt.

[1]) L. J. Sivian, J. acoust. Soc. amer. 7 (1935) S. 94.

Da das Luftpolster keine nichtlinearen Verzerrungen aufweist, so erklärt sich auch, wieso die Schwingungen des Trommelfelles entgegen den Erwartungen eine so kleine Nichtlinearität besitzen. Bohrt man das Mittelohr an und mißt so die Trommelfellimpedanz, so ergaben sich für das frische, in der Feuchtigkeitskammer aufbewahrte Präparat Werte, die einem Volumen meist größer als 8 cm³ entsprachen. Da sich jedoch dieser Wert je nach dem Feuchtigkeitsgrad der Luft sehr stark ändert, so kann er nur zur Orientierung dienen.

Es ist zu hoffen, daß es gelingen wird, am Lebenden über die Eustachische Röhre eine Sonde in das Mittelohr einzuführen und auf diese Weise vom Mittelohr aus die wahre Impedanz des Trommelfelles zu bestimmen. Dies wäre um so wichtiger, als anzunehmen ist, daß die vom Trommelfell aufgenommene Schallenergie nicht in ihrer Gesamtheit dem Innenohre zugeführt wird, sondern bei den Luftströmungen im porösen Teil des Mittelohrvolumens bereits viel verlorengeht.

4. Zupfschwingungen des Trommelfells

Für die Untersuchung der Schwingungsform der Gehörknöchelchen ist es wichtig zu wissen, ob die Elastizität der Bänder am Präparat mit der Zeit ebensolche Abweichungen vom Normalzustand zeigen kann wie die beim Trommelfell. Zu diesem Zweck wurden die Zupfschwingungen des Hammerstieles aufgenommen. Um das Trommelfell einem möglichst kurzen Druckstoß auszusetzen, wurde der Knall eines Funkens verwandt. Wie die Abb. 8 zeigt wurden in die beiden Schenkel eines *T*-Rohres aus Glas die Elektroden der Funkenstrecke luftdicht mit Paraffin eingeschmolzen und der entstehende Knall über eine etwa 2 m lange Röhre dem Gehörgang zugeführt. Da die Dämpfung der Gehörknöchelchenschwingungen recht groß ist, so sind bei dieser Röhrenlänge bereits die Schwingungen abgeklungen, ehe der reflektierte Knall eintrifft. Um störende Reflektionen zu vermeiden, muß die Röhrenweite dem Gehörgang angepaßt werden und überall einen gleichen Querschnitt besitzen. Die Funken wurden durch eine Influenzmaschine hergestellt und die Knallstärke durch Einschalten von verschieden großen Leidener Flaschen geändert. Tritt ein Sprühen der Elektroden ein, so wird der Knall unsauber, was meist durch Erwärmen des *T*-Rohres beseitigt werden kann. Zweckmäßig bringt man an das *T*-Rohr noch eine enge Kapillare *K* an, damit die durch Erwärmung eintretenden Druckschwankungen in der Röhre sich ausgleichen können und nicht auf das Trommelfell wirken.

Der Gehörgang wurde in der früher beschriebenen Weise seitlich mit einem Fenster versehen, durch das die Schwingungen der an dem

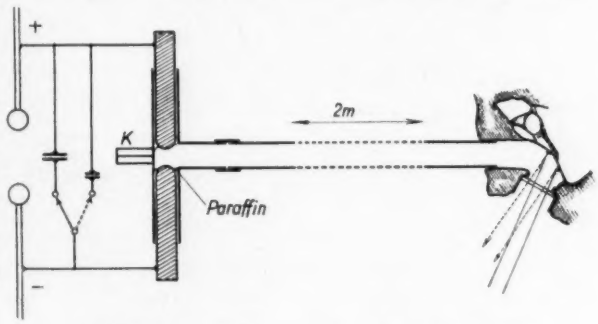

Abb. 8. Anordnung zur Aufnahme von Zupfschwingungen von Membranen

Hammerstiel und dem Trommelfell befestigten Spiegel von weniger als 0,5 mm² Fläche oszillographiert werden konnten.

In der oberen Aufnahme der Abb. 9 sind die Zupfschwingungen des unteren Teiles des Trommelfelles zu sehen, während die untere Aufnahme die Schwingungen des Hammerstieles darstellt. Wiederholte Beobachtungen zeigten, daß die Eigenfrequenz des Mittelohres in Übereinstimmung mit O. Frank[1]) und den am Lebenden gefundenen Werten[2]) zwischen 800 und 1500 Hz lag und sich mit der Zeit kaum merklich änderte. Was ja auch zu erwarten war, da das Trommelfell nur eine Dicke von 0,1 mm besitzt und somit ganz bedeutend rascher austrocknen muß als die Bänder.

Die beiden Aufnahmen zeigen, daß am Trommelfell auch kräftige Oberschwingungen entstehen, die allerdings nur vermindert auf den Hammerstiel übertragen werden. Bringt man in

[1]) O. Frank, a. a. O.

[2]) Physik. Z. 34 (1933), S. 577.

die zum Gehörgang führende Röhre etwas Watte, so wird der scharfe Einsatz des Knalles etwas abgeflacht, wodurch die Oberschwingungen nicht mehr angestoßen werden. Auf diese Weise erhält man, wie die Abb. 10 zeigt, Zupfschwingungen, die denen beim Lebenden, durch Tubenknall, erhaltenen Schwingungen vollkommen gleich sind, wobei jedoch die erste Halbschwingung noch nicht als freie Schwingung aufgefaßt werden kann.

5. Schutzwirkung des Mittelohres gegenüber übermäßig großen Druckamplituden

Ähnlich wie das Auge in der Irisblende ein Schutzmittel gegen Blendung besitzt, erwartet man auch vom Mittelohre, besonders wegen seiner verwickelten Form, daß es das Innenohr vor übermäßig starken Schalleinwirkungen schützt. Man nahm im allgemeinen an, daß die beiden Binnenohrmuskel, von denen der Trommelfellspanner die Mitte des Trommelfelles nach dem Inneren des Kopfes zieht, zu diesem Zwecke dienen, da ihre Kontraktion unwillkürlich mit der Lautstärke der Schalleinwirkung zunimmt. Doch zeigte W. GEFFCKEN[1]) durch Impedanzmessungen des Trommelfelles, daß durch eine willkürliche Tensorkontraktion die Schwingungsfähigkeit des Trommelfelles nur wenig geändert wird. Ebenso ergab ein Luftdruck von 10 cm Wassersäule nur eine etwa 10%ige Amplitudenverminderung der Trommelfellschwingungen.

An einem frischen Felsenbein kann man ebenfalls beobachten, daß beim Eintreten der Leichenstarre, wo sämtliche Muskel straff gespannt werden, die Schwingungsamplitude des Trommelfelles und der Gehörknöchelchen bei konstant gehaltenem Schalldruck sich höchstens etwa auf den dritten Teil vermindert, wie dies allerdings nur einmal untersucht werden konnte. Es stellt daher die Tensorkontraktion wegen des großen Schalldrucksbereichs kaum ein wirksames Schutzmittel dar.

[1]) W. GEFFCKEN, a. a. O.

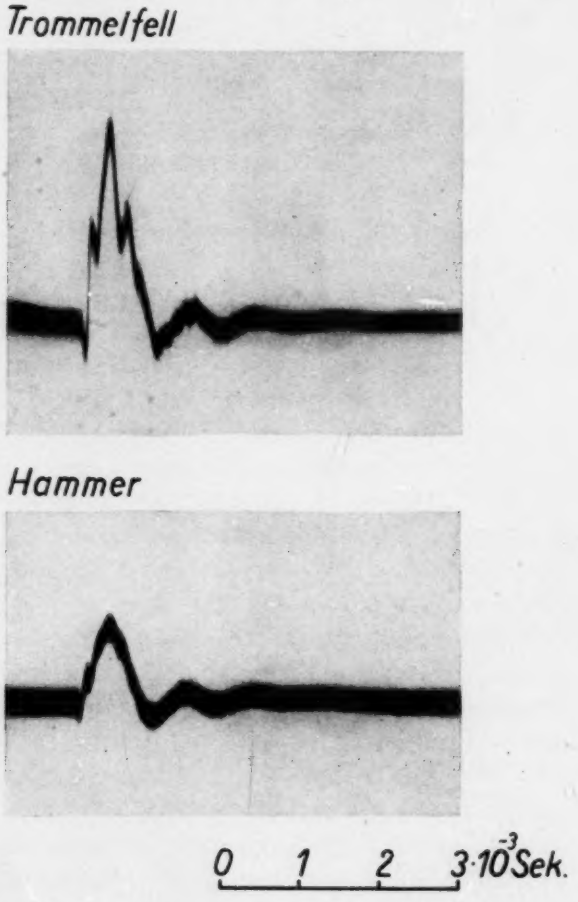

Abb. 9. Zupfschwingungen des Trommelfelles und des Hammerstieles

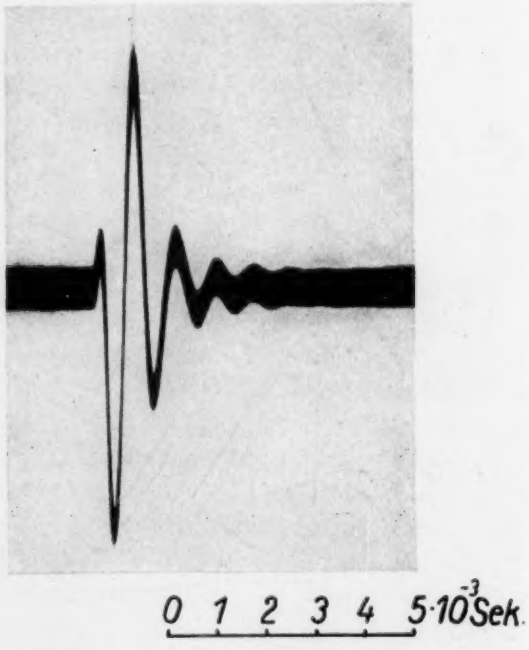

Abb. 10. Die tiefsten Eigenschwingungen des Hammerstieles

Beobachtet man bei einem mittleren Schalldruck die Schwingungen der Gehörknöchelchen, so bewegt sich bei einer Luftdruckzunahme, wie die obere Zeichnung der Abb. 11 zeigt, der Hammerstiel nach dem Inneren des Kopfes und nimmt hierbei den unteren Teil des Ambosses mit sich, wobei der eingezeichnete Punkt als Drehpunkt dient. Da die Steigbügelfußplatte auf ihrem vorderen Teil mit loseren Bändern an die umgebenden Knochenwände befestigt ist als am hinteren Teil, so vollführt sie hierbei eine Drehbewegung um eine in der Abb. 11 vertikal gezeichnete, durch den hinteren Rand der Fußplatte gehende Achse. Durch diese Drehung wird die Flüssigkeit besonders durch den vorderen Teil der Platte in den Schneckenkanal gepreßt.

Wird die Bewegungsamplitude des Trommelfelles immer größer, so geht schließlich diese Schwingungsform ziemlich plötzlich und in gut wiederholbarer Weise in eine andere über, bei der, wie die untere Zeichnung zeigt, der Steigbügel sich um eine durch die Längsachse der Fußplatte gehende Achse dreht. Dabei wird nun die Flüssigkeit im Innenohr lediglich von der oberen Hälfte der Fußplatte zu der unteren verschoben, ohne daß dabei ein Einpressen der Flüssigkeit in den Schneckenkanal eintritt. Da die Fußplatte des Steigbügels ziemlich schmal ist, so wird auf diese Weise die Übertragung einer übermäßig großen Schwingung des Trommelfelles auf die Flüssigkeit des Innenohres in sehr wirksamer Art unterbrochen.

Für die Frequenzen oberhalb 100 Hz erfolgt der Übergang derart, daß bei den größeren Schalldrucken zu der ersten normalen Schwingungsform noch die zweite hinzukommt und sich dieser überlagert, so daß bei der weiteren Schalldruckzunahme noch eine verlangsamte Zunahme der in den Schneckenkanal gepreßten Flüssigkeitsmenge auftritt. Bei den tieferen Frequenzen jedoch, besonders unterhalb 20 Hz, die in der Natur in Form von Donner und Windstoß wohl am häufigsten mit großen Druckamplituden auftreten, sind die beiden Schwingungsformen scharf voneinander getrennt, so daß bei den großen Drucken eine weitere Zunahme des Schalldruckes eine Verminderung der Flüssigkeitsverschiebung im Schneckenkanal und damit der Lautstärke ergibt. Diese Lautstärkenabnahme bei einer Schalldruckzunahme wurde schon

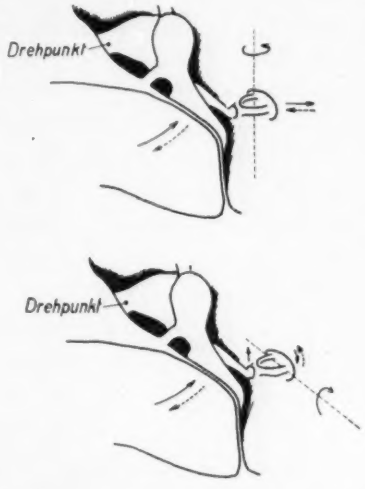

Abb. 11. Schwingungsform der Gehörknöchelchen unterhalb und oberhalb der Schmerzgrenze

früher bei 5 und 10 Hz beschrieben[1]). Das Aufhören der Lautstärkenzunahme tritt bei genau dem gleichen Schalldrucke ein, bei dem ein Umspringen der Schwingungsform am frischen Präparat erfolgt.

Diese für den Schutz des Innenohres so wichtige Änderung der Schwingungsform der Gehörknöchelchen bei übermäßig großen Schalldrucken wird dadurch erleichtert, daß die Gehörknöchelchen nicht um eine feste Drehachse schwingen, sondern um einen Drehpunkt, der durch den Berührungspunkt des kurzen Amboßstieles mit der Mittelohrwand gebildet wird. Die Labilität der Gehörknöchelschwingungen wird noch dadurch erhöht, daß die Schwingungsachse des Steigbügels gegenüber der Schwingungsebene des Hammers und Ambosses etwa um 20—35° verdreht ist. Auf diese Weise wird daher der so unnötig kompliziert erscheinende Aufbau des Mittelohres etwas verständlich.

Da zum Schutz des Innenohres die durch ein Gelenk miteinander verbundenen Gehörknöchelchen sich im Mittelohr ausgebildet

[1]) Ann. Physik (5) 26 (1936), S. 554.

haben, so entsteht die Schwierigkeit, daß bei der Übertragung der Schwingungen von dem einen Gehörknöchelchen zum anderen leicht ein Klirren auftritt. Wird nämlich der Anpreßdruck zweier schwingender Körperchen kleiner als die während der Schwingungen auftretende Beschleunigungskraft, so lösen sie sich voneinander ab und es tritt die bekannte Erscheinung des Sandkornspringens auf einer schwingenden Platte auf[1]). Sind die Schwingungen klein, so erzeugen wohl die elastischen Bänder einen genügenden Anpreßdruck, so daß keine besonderen Maßnahmen notwendig sind. Bei den größeren Schwingungen jedoch dürfte dies nicht mehr zutreffen und es wird daher verständlich, warum im Mittelohr Muskel vorhanden sind, die im wesentlichen gegeneinander wirken und das Steigbügelgelenk auf den Amboß drücken, wobei auch gleichzeitig die übrigen Bänder gespannt werden.

Da die Beschleunigungskraft bei sinusförmigen Schwingungen proportional der Schwingungsamplitude und dem Quadrat der Schwingungszahl ist, so ist zu erwarten, daß diese beiden Muskel besonders auf die hohen Töne ansprechen und sich mit zunehmendem Schalldruck immer mehr kontrahieren, was auch in Wirklichkeit zutrifft.

Die maximalen Beschleunigungskräfte im Mittelohr, bei denen noch kein Klirren auftreten darf, sind gegeben durch den Schalldruck an der Schmerz- und Kitzelgrenze und sind von der Größenordnung von 20 g. Um zu überprüfen, ob der Trommelfellspanner diese Kraft erzeugen kann, mißt man z. B. bei 400 Hz bei einer Person, die willkürlich den Muskel anspannen kann, die dadurch eintretende Änderung der Impedanz des Trommelfelles und vergleicht sie mit der Änderung, die bei der Einwirkung eines konstanten Luftdruckes entsteht. Stellt man insbesondere auf gleiche Änderung der Blindkomponente der akustischen Impedanz, d. h. der elastischen Kräfte des Trommelfelles ein, so ist der Tensorkontraktion etwa ein Luftdruck von 10—20 cm Wassersäule gleichwertig, was den Forderungen entspricht.

Anatomisch ist es auffallend, daß die beiden Mittelohrmuskel ihrer ganzen Länge nach in je eine ganz eng anliegende Knochenröhre eingelagert sind. Dies ist notwendig, damit sie nur eine Zugwirkung ausüben und nicht in Schwingungen geraten, da sonst Untertöne im Mittelohr entstehen würden[1]).

Verbindet man die Pumpe, die zur Herstellung der tiefen Luftdruckschwankungen dient, nicht nur mit dem Gehörgang des Präparates, sondern gleichzeitig noch mit einem Manometer und dem eigenen Gehörgang, so kann man gut beobachten, daß das Entstehen der zweiten Schwingungsform beim Präparat mit der Schmerzempfindung im eigenen Ohre gleichzeitig auftritt.

In dem Frequenzbereich von 0,5 bis 10 Hz gaben fast alle Beobachter an, daß die Schmerzgrenze durch Berührung oder gegenseitige Reibung zweier Flächen im Mittelohr entstehen muß. Besonders bei sehr lang dauernden Druckeinwirkungen hatte man die Empfindung, daß eine ganz bestimmte kleine Fläche wundgerieben wird. Es ist möglich, daß bei der Änderung der Schwingungsform die Bänder und das Gelenk der Gehörknöchelchen übermäßig gespannt werden und dadurch die Schmerzempfindung entsteht. Doch ist es wahrscheinlicher, daß durch die Drehung des Steigbügels um die Längsachse der Fußplatte die beiden Schenkel des Steigbügels mit den Seitenwänden des Mittelohres in Berührung kommen, da der Steigbügel, wie die Abb. 12 zeigt, ziemlich tief in einer kleinen Nische steckt. In der Abb. 12 sind die beiden Schenkel des Steigbügels und die rechts und links befindlichen Seitenwände der tiefen Nische beobachtbar. In Wirklichkeit ist der Abstand zwischen dem Schenkel des Steigbügels und der rechts befindlichen Seitenwand noch kleiner, da bei dem abgebildeten Präparat die an dem Knochen befindlichen Hautschichten absichtlich sehr stark eingetrocknet wurden, damit die beiden Schenkel des Steigbügels besser sichtbar werden. Die gleichen Verhältnisse zeigt

[1]) W. H. Bragg, Engin. News-Rec. (1919); N. Andrejew, Elektr. Nachr.-Techn. 8 (1931), S. 488; M. J. O. Strutt, Exp. Wirel. 8 (1931), S. 238.

[1]) Müller-Pouillet, Fadenversuch von Melde, Bd. I, Teil 3; E. Waetzmann (1920), S. 37.

auch ein mikroskopischer Schnitt von A. KEITH[1]).

Es ist anzunehmen, daß durch die geringe Breite der Nische die seitlichen Schwingungsamplituden des Steigbügels begrenzt werden, denn die Beobachtungen zeigten, daß trotz starker Vergrößerung der Schwingungen des Trommelfelles die seitliche Bewegung des Steigbügelgelenkes konstant blieb und die Schwingungen in den Bändern des Hammers und Ambosses gefedert wurden. Dies bewirkt eine weitere Sicherung gegen übermäßig große Schwingungen. Eine Bewegung des Gelenkes zwischen Hammer und Amboß konnte jedoch im allgemeinen nicht beobachtet werden[2]), so daß dieses Gelenk wahrscheinlich verwachsen ist.

Abb. 12. Lage des Steigbügels im Mittelohr

Besonders die rechts befindliche Seitenwand kommt dem Steigbügel sehr nahe, so daß bei jeder Schwingung einmal eine Berührung auftritt. Bei einem Schalldruck von 1 Hz kann man an einem Manometer verfolgen, daß bei jeder Schwingung einmal beim Druckmaximum ein Stechen im Mittelohr auftritt, was vollkommen mit den anatomischen Beobachtungen übereinstimmt.

Von diesen Schmerzempfindungen sind die Berührungsempfindungen zu trennen, die eher eine Druckempfindung auf die gesamten Oberflächengewebe des Gehörganges, des Trommelfelles und des Mittelohres darzustellen scheinen.

6. Zusammenfassung

Das verhältnismäßig gute Hören der tiefen Frequenzen bei fehlendem Trommelfell wird dadurch erklärt, daß beim gleichzeitigen Einwirken des Schalldruckes auf den Steigbügel und das runde Fenster ein Abströmen der Schneckenflüssigkeit nach dem Inneren des Kopfes erfolgt, wodurch die Basilarmembran in ähnliche Schwingungen versetzt wird wie beim normalen Hören. Die dabei auftretende Phasenumkehr der Schwingungen der Basilarmembran wird durch das Richtungshören bestätigt. Durch ein künstliches Trommelfell kann die normale Schwingungsrichtung wiederhergestellt werden. Am Leichenohr wird das Trommelfell perforiert und die Abnahme der Schwingungsamplitude des Hammerstieles für die verschiedenen Frequenzen gemessen. Daraus ließ sich folgern, daß das Trommelfell sehr schlaff ist und daß bei der Messung der Impedanz des Trommelfelles zum Teil die Elastizität des durch das Mittelohr gebildeten Luftpolsters gemessen wird.

Vom Mittelohre ließ sich zeigen, daß es eine Schutzvorrichtung des Innenohres darstellt, indem die Gehörknöchelchenkette sich in einem unstabilen Gleichgewicht befindet und bei größeren Schalldrucken in eine Schwingungsform umkippt, bei der die Bewegungen des Trommelfelles nicht mehr auf die Schneckenflüssigkeit übertragen werden. Durch diese besondere Schwingungsform fand auch das Entstehen der Schmerz- und Kitzelschwelle ihre Erklärung.

Zum Schluß möchte ich auch an dieser Stelle den Herren A. GÖTZE, G. KEREKES, E. KRATOFIL, S. KREPUSKA, A. REJTÖ und T. SZÁSZ für ihr freundliches Entgegenkommen in medizinischen Fragen meinen herzlichsten Dank aussprechen.

(Eingegangen 18. Juni 1936)

[1]) THOMAS WRIGHTSON, The analytical mechanism of the internal ear. Macmillan and Co. Ltd., London (1918), S. 45, Fig. 18.

[2]) H. HELMHOLTZ, a. a. O.

Schalldämmessungen in der Praxis und Vorschläge zur Normung des Schallschutzes von Wohnungstrennwänden und Decken

Von A. Gastell

Mitteilung aus dem Institut für Schwingungsforschung an der Technischen Hochschule Berlin

Mit 11 Abbildungen

Genaue Schalldämmessungen wurden bisher in der Regel in Laboratorien an besonders ausgeführten Prüfwänden vorgenommen. Die zu untersuchende Wand wird hierzu in eine 2×2 m² große Öffnung einer sehr gut isolierenden Wand zwischen zwei Hallräumen eingebaut. Die Schalldämmzahl wird als der zehnfache Logarithmus der auf die Wand auffallenden zur abgestrahlten Schalleistung definiert und nach folgender Formel in dezibel berechnet:

$$(1) \qquad D = 10 \log_{10} \frac{E_1}{E_2} - 10 \log_{10} \frac{A}{F},$$

wobei E_1 und E_2 die gemessene Schalldichte im Sende- bzw. Empfangsraum bedeuten. A (m²) ist die Gesamtschallschluckfläche des Empfangsraumes und F die Fläche der Prüfwand. Abb. 1 zeigt eine schematische Skizze des Schalldämmregistrierverfahrens nach E. Meyer[1]). Im Senderaum wird durch einen Überlagerungssummer über zwei Lautsprecher ein gleitender Heulton erzeugt und seine Schalldichte über ein Kondensatormikrophon, ein logarithmisches Röhrenvoltmeter[2]) und ein Registrierinstrument auf einer Trommel mit lichtempfindlichem Papier aufgeschrieben. Da die Registriertrommel mit dem Drehkondensator des Überlagerungssummers synchron läuft, erhält man eine Aufzeichnung des Frequenzganges der Schalldichte; dies geschieht zunächst im Senderaum. Die Schallsendeanlage ist derart ausgewählt, daß die Schalldichte im Senderaum fast frequenzunabhängig ist, die Schalldruckaufzeichnung also eine Gerade parallel zur Abszisse ergibt. Dann wird das Mikrophon in den Empfangsraum getragen und von neuem auf demselben Papier der Schalldruck im Empfangsraum festgehalten. Die Differenz der beiden Kurven gibt unmittelbar die Schalldämmung in db an, da der Quotient A/F in dem Empfangsraum des Instituts für Schwingungsforschung nahezu gleich 1 ist, sich seine Berücksichtigung also erübrigt.

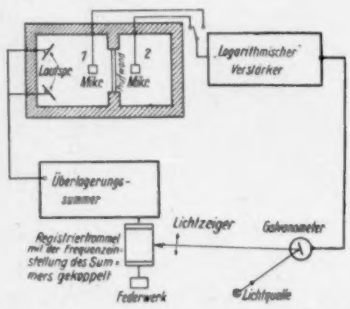

Abb. 1. Schematische Zeichnung des Schalldämmregistrierverfahrens nach E. Meyer

Bei allen Messungen im Laboratorium, bei denen auch andere Verfahren[1]), z. B. durch

[1]) E. Meyer, Elektr. Nachr.-Techn. 12 (1935), S. 393.

[2]) E. Meyer u. L. Keidel, Elektr. Nachr.-Techn. 12 (1935), S. 37.

[1]) Das sog. Reizschwellenverfahren nach Doorentz s. Schall- und Erschütterungsschutz f. Hochbauten (Herausgeber Deutscher Betonbauverein), Berlin 1935, Verlag von Wilhelm Ernst u. Sohn,

Hörvergleich mittels eines Dämpfungsgliedes[1]) angewendet wurden, hat man im wesentlichen das schon von R. Berger[2]) erhaltene Resultat bestätigen können, daß die Schallisolation einer Einfachwand proportional dem Logarithmus des Wandgewichts ansteigt[1]).

Bei all den Untersuchungen — besonders nach Meyer und Keidel — hat man zwar eine sehr große Genauigkeit erreicht, doch war es noch nicht gewiß, ob Wände in der praktischen Ausführung im Häuserbau dieselbe Schallisolation zeigen wie bei der Prüfung im Laboratorium.

Es war daher der Zweck der vorliegenden Untersuchungen, die auf Anregung des Instituts für Schwingungsforschung im Auftrage und mit Unterstützung der Stiftung zur Förderung von Bauforschungen und des Deutschen Normenausschusses durchgeführt wurden, Schalldämmessungen in der Praxis vorzunehmen und mit den im Laboratorium ermittelten Werten zu vergleichen.

Als Meßobjekte standen die Versuchssiedlung Haselhorst der Gemeinnützigen Wohnungsbau AG., sowie einige staatliche, städtische und private Gebäude zur Verfügung[3]).

Die Laboratoriumsgeräte liefern zwar genaue Werte der Schallisolation, doch sind sie wegen ihres größeren Umfanges zu Messungen in praktischen Bauten schwer zu verwenden. Es wurde daher zunächst ein Meßverfahren entwickelt, das bei möglichst geringem apparativen Aufwand eine verhältnismäßig genaue Messung von Luftschalldämmwerten gestattet.

Der Schallsender

Zur Ausführung von derartigen Messungen benötigt man einen Schallgeber und -empfänger. Als Schallsender wurde ein Schallplattenspieler in Verbindung mit einem 10 Watt-Verstärker und einem elektrodynamischen Lautsprecher benutzt. Die Einzelteile — von der Firma Telefunken freundlicherweise als Leihgabe zur Verfügung gestellt — wurden zu einem tragbaren Gerät zusammengebaut.

Um eine einigermaßen gleichmäßige Schallfeldverteilung in den Räumen zu erzielen, mußte ein Heulton verwendet werden. Der starke Frequenzgang der Schalldämmung — besonders für zusammengesetzte Wände — verlangte eine Messung bei mehreren Frequenzen. Es wurden daher 4 Schallplatten geschnitten, die Heultöne von 140 ± 60, 400 ± 200, 900 ± 300 und 2100 ± 900 Hz lieferten. Die Schallplatten zeigten nach dem Buchmann-Meyer[1])-Verfahren geprüft die gleiche Schnelle und gaben damit konstante Lautstärke während der ganzen Spieldauer der Platte. Der Klirrfaktor, der bei tiefen Frequenzen am meisten stören würde, erwies sich als sehr klein. Auch durch die Abnutzung beim Gebrauch war kein starkes Anwachsen des Klirrfaktors zu bemerken. Nach 200maligem Abspielen stieg die Intensität für die Frequenzen von 300—5000 Hz um etwa 4 db an, lag damit aber noch 25 db unter der Intensität des Wertes für 200 Hz. Außerdem war dann die Schallplatte nicht mehr zu brauchen, weil der Rand zwischen zwei Rillen an vielen Stellen weggebrochen war.

Der Schallempfänger

Als Schallempfänger wurde — trotz einiger Nachteile für die Luftschallmessungen — ein Lautstärkemesser[2]) benutzt, da noch gleichzeitig andere Messungen vorgenommen wurden (s. w. u.). Da während der Untersuchungen noch kein Gerät, das einen Bereich von 20 bis 110 Phon umfaßte, im Handel erhältlich war,

mittels des Stimmgabelfallhammers liefert nach Untersuchungen von Schoch und Gastell sehr ungenaue Resultate und verliert den einzigen Vorteil seiner Einfachheit, wenn man — wie es bei Mehrfachwänden unbedingt notwendig — den Frequenzgang der Schallisolation berücksichtigen muß.

[1]) E. Meyer, S.-B. Preuß. Akad. Wiss., Physik.-math. Kl. IX, 1931.

[2]) R. Berger, Diss. München 1911.

[3]) Den Verwaltungen all dieser Gebäude sei auch hier für ihre Hilfsbereitschaft gedankt.

[1]) G. Buchmann und E. Meyer, Elektr. Nachr.-Techn. 7 (1930), S. 147.

[2]) Seine Verwendung beruhte neben der Gewichtsersparnis für einen besonderen Schalldruckmesser auch auf der anfangs geplanten Einführung einer Lautdämmung (Lautstärkeverhältnis vor und hinter der Wand), die sich jedoch wegen der intensitätsabhängigen Ohrempfindlichkeit als unzweckmäßig erwies.

wurde der Geräuschmesser[1]) des Instituts für Schwingungsforschung benutzt. Er besteht aus einem hochwertigen Kondensatormikrophon, das mit dem Vorverstärker in einen körperschallgesicherten Kasten eingebaut ist, und einem vierstufigen Verstärker, dessen Frequenzgang entsprechend der Ohrkurve verzerrt ist. Zur Anzeige dient ein Gleichrichterinstrument, dessen Meßbereich durch ausgefeilte Polschuhe annähernd logarithmisch geht und 30 Phon umfaßt. Der gesamte Intensitätsumfang von 20 bis 110 Phon ist in vier sich überlappende Bereiche von 30, 50, 70 und 90 Phon eingeteilt, die durch Überbrücken der einzelnen Verstärkerstufen eingeschaltet werden. Damit ist gleichzeitig eine Änderung der Frequenz- und Intensitätskurve entsprechend den Ohreigenschaften verbunden. Die Eichung des Gerätes geschah durch ein Summertelefon mit konstanter Spannung. Diese Kontrolle wurde während einer Messung mehrere Male wiederholt, obwohl sich kaum größere Änderungen als 1 Phon zeigten.

Die Meßmethode

Nach einigen Vorversuchen, bei denen sich ergab, daß man die Absorption des Empfangsraumes unbedingt berücksichtigen muß, wurde die Messung folgendermaßen vorgenommen. Es sei die Schallisolation einer Trennwand zwischen zwei Räumen A und B zu bestimmen. Zunächst wird in A für jede Frequenz eine bestimmte Lautstärke erzeugt, deren Mittelwert in Phon durch Messung an 6—8 verschiedenen Stellen des Raumes mit dem Lautstärkemesser festgestellt wird. Im Raum B wird ebenfalls die Lautstärke ermittelt. Dann wird der Schallsender in den Raum B geschafft und die Messung im umgekehrten Sinne wiederholt. Im ganzen wurden also zur Bestimmung der Schalldämmung für alle Tonhöhen rd. 100—120 Ablesungen gemacht. Zur Auswertung der Messungen werden die erhaltenen Mittelwerte an Hand der Frequenz und der Intensitätskennlinien des Lautstärkemessers von Phon in dezibel umgerechnet. Durch Differenzbildung erhält man die Schalldämmung der Wand zunächst ohne Berücksichtigung des 2. Gliedes der Formel (1), $-10 \log \frac{A}{F}$. Die Wandfläche F wurde stets mitbestimmt. Die Messung von A geschah folgendermaßen: Die Leistung des Schallsenders für eine bestimmte Frequenz sei N, dann ist — die Gültigkeit der JÄGERschen Nachhalltheorie vorausgesetzt — die Energiedichte im Raum

$$E = \frac{4}{c} \frac{N}{A},$$

wobei A (m²) $= \Sigma (a \cdot S)$ die gesamte Schallschluckfläche des Raumes und c die Schallgeschwindigkeit bedeuten. Es ist also die Energiedichte E proportional $\frac{N}{A}$, d. h. man kann durch Messung von E bei konstantem N A bestimmen. Für ein und dieselbe Frequenz ist für einen Bereich von 70—110 Phon die Anzeige des Lautstärkemessers bis auf einen additiven Wert gleich 10 log E. Man kann also schreiben

$$L = C - 10 \log A,$$

wobei in C als einzige Veränderliche die Schallleistung N des Senders auftritt. Mittels eines Wechselstrominstrumentes konnte der Lautsprecherstrom stets auf denselben Wert eingestellt werden und damit die Schalleistung konstant gehalten werden. Durch öfter vorgenommene Kontrollversuche im Hallraum des Instituts für Schwingungsforschung wurde gezeigt, daß die Schalleistung bei derselben Einstellung des Lautsprecherstromes während der ganzen Zeit der Untersuchungen genügend konstant blieb. Die Rückwirkung der Räume auf den Schallsender konnte ebenfalls vernachlässigt werden. Durch Messung von L in einem Raum bekannter Schallschluckfläche kann man C bestimmen. Trägt man, wie in Abb. 2 geschehen ist, die Schluckfläche A über der Lautstärke L für alle 4 Frequenzen auf, so kann man aus der im Versuchsraum gemessenen Lautstärke sofort die zugehörige Schallschluckung ablesen. Da die Ordinate logarithmisch geteilt ist, läßt sich mit Hilfe eines Steckzirkels (Spannweite log F) an einer zweiten Ordinateneinteilung direkt 10 log A/F ablesen. Durch die Vertauschung des Sende- und Empfangsraumes erhöht man einmal die Meßgenauigkeit und kann andererseits aus der in beiden Räumen

[1]) W. WILLMS, Elektrotechn. Z. 1935, S. 53.

gemessenen Lautstärke die Schluckfläche des jeweiligen Empfangsraumes bestimmen und die Schalldämmung nach Gl. (1) angeben.

Wenn die Schallschluckung in den einzelnen Meßräumen nahezu gleich wäre, so könnte man

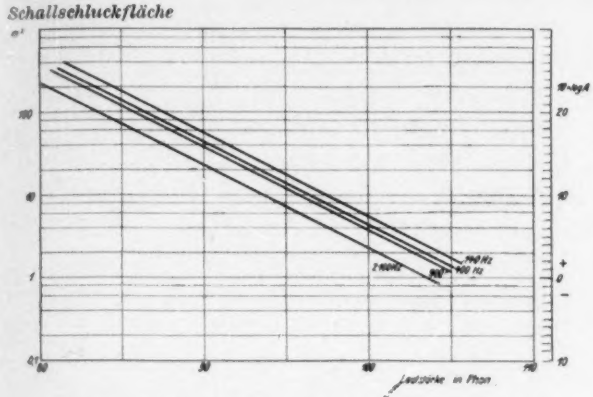

Abb. 2. Die Lautstärke des Schallsenders in Abhängigkeit von der Schallschluckfläche des Versuchsraums

mit Durchschnittswerten rechnen und sich die jedesmalige Messung sparen. Die vorgenommenen Untersuchungen zeigten jedoch, daß es nicht möglich ist, derartige Zahlen anzugeben. Selbst für einzelne Zimmerarten, wie z. B. Schlafzimmer, ist die Angabe einer mittleren Schallschluckfläche für Schalldämmessungen zu fehlerhaft. Man muß sie in jedem Falle erneut bestimmen. In Abb. 3 sind für einige Wohnraumarten die gemessenen Schallschluckflächen eingetragen. Wie zu erwarten, zeigen Leerzimmer die geringste Schallschluckung. Ebenfalls verständlich erscheint, daß in Schlafzimmern die größte Schluckung festgestellt wird. Die dort gemessenen großen Werte (bis zu 140 m² bei nur ca. 80 m² Wandoberfläche) sind wohl darauf zurückzuführen, daß hier die Voraussetzungen, die zu dieser Messung führen, nicht mehr erfüllt sind. Damit werden die festgestellten Werte der Schluckfläche nicht richtig sein. Die Verkleinerung der Schalldichte durch die hohe Absorption des Raumes wird jedoch richtig bestimmt. Denn die Schallschluckmessung im Empfangsraum bedeutet ja nur, daß die schallabstrahlende Wand durch eine geeichte Schallquelle ersetzt und damit die notwendige Korrektur ermittelt wird. Eine Abhängigkeit der Schalldämmung von der Schallschluckung des Empfangsraumes war nicht festzustellen.

Führt man die Schalldämmessung so wie oben angegeben aus, so erhält man für alle vier Frequenzen je zwei Werte, deren Mittel gebildet wurde. Als Schalldämmzahl wird allgemein der planimetrische Mittelwert über den logarithmisch aufgetragenen Schwingungszahlenbereich von 100—3000 Hz angegeben; da im vorliegenden Fall die vier Meßfrequenzen nahezu gleichmäßig über das Frequenzband verteilt waren, ergab das arithmetische Mittel aus den Werten für die einzelnen Frequenzen mit einem Fehler < 1 db die Schalldämmzahl der untersuchten Wand. Nach dieser Methode wurden sämtliche Messungen ausgewertet. Die Genauigkeit der Anordnung betrug im Mittel $\pm$ 1,5 db, wie mehrmals an derselben Wand durchgeführte Messungen ergaben. Vergleichsmessungen mit dem Registrierverfahren an im Laboratorium ausgeführten Wänden vor-

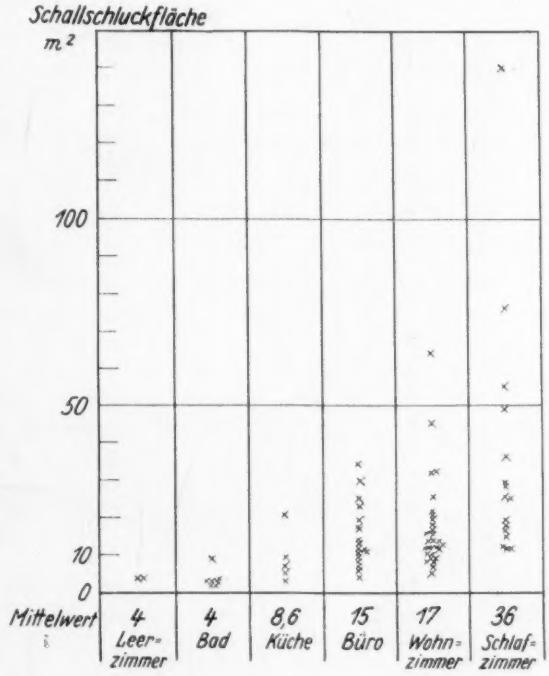

Abb. 3. Schallschluckung von Wohnräumen

genommen, zeigten gleichfalls eine Übereinstimmung innerhalb der oben angegebenen Grenzen.

In Abb. 4 sind die Meßergebnisse für Einfachwände dargestellt. Die ausgezogene Linie gibt die Wandgewichtskurve des Instituts für Schwingungsforschung wieder. Oberhalb von

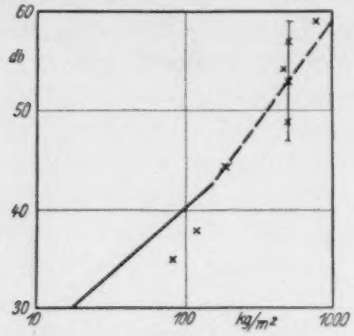

Abb. 4. Schalldämmung von Einfachwänden in der Praxis

150 kg/m² ist sie mit zu wenig Meßpunkten belegt. Auch in anderen Laboratorien sind in diesem Gebiet nur wenig Werte bestimmt. Man paßt sich allen bisher vorhandenen und den in der Arbeit festgestellten Meßpunkten am besten an, wenn man eine Linie nach Art der gestrichelten Geraden hindurchlegt. Man erhält damit für schwerere Wände ein stärkeres Anwachsen der Schalldämmung mit dem Wandgewicht. Die einzelnen Kreuze stellen die Mittelwerte der Schalldämmzahlen von Wänden entsprechenden Gewichts dar. Die Wand von 780 kg/m² war eine Brandmauer und ist nur in

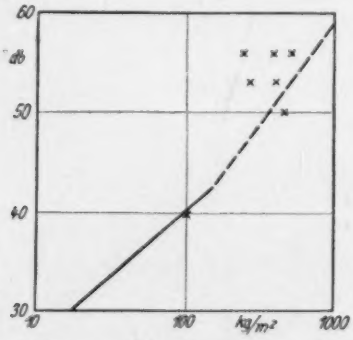

Abb. 5. Schalldämmung von mehrschäligen Wänden und Decken in der Praxis

einer Ausführung gemessen worden. Für die 16 Wände vom Gewicht von 480 kg/m² ist noch der mittlere Fehler (± 4 db) und die maximale Abweichung (ca. 12 db) eingetragen. Da diese Fehler größer sind als der Meßgenauigkeit der Anordnung entspricht, sind die gemessenen Unterschiede auf Verschiedenheiten der bautechnischen Ausführung der Wände zurückzuführen.

Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit E. LÜBCKE[1]), der bei gleichem Gewicht der Wände aber verschiedener Steife und Porosität, Unterschiede in den Dämmzahlen erhielt. Die Fläche der untersuchten Wände schwankte zwischen 10 und 14 m² und zeigte keinerlei Beziehung zu den Schalldämmzahlen. Auch an gleichartigen Wänden in der Versuchsöffnung des Instituts für Schwingungsforschung werden Unterschiede bis zu 5 db festgestellt.

Die Mittelwerte der Schalldämmzahlen für die Einfachwände verschiedenen Gewichts liegen innerhalb der Streuung auf der oben beschriebenen Wandgewichtskurve und zeigen die Übereinstimmung der Laboratoriumswerte mit denen in der Praxis.

Abb. 5 zeigt die Meßergebnisse an mehrschaligen Wänden und an Decken, die letzteren zeigen infolge ihrer zusammengesetzten Bauweise mehr den Charakter einer Mehrfachwand. Sie liegen bis auf zwei alle über der Wandgewichtskurve und bestätigen das Resultat von Laboratoriumsuntersuchungen[2]), daß mehrschalige Wände durchweg höhere Schallisolation zeigen als Einfachwände. Die höchste zusätzliche Dämmung von 9 db zeigt eine Wand mit beiderseitig 1,5 cm Putz, 5 cm Gipsascheplatten und 12 cm Koksaschefüllung.

Trittschall

Neben den Messungen der Luftschalldämmung an Decken und Wänden wurde auch die Trittschalldurchlässigkeit von Decken bestimmt.

[1]) E. LÜBCKE, Z. techn. Physik 17 (1936), S. 54. Die Herabsetzung der Schalldämmung durch feine Haarrisse um ca. 10 db konnte nicht bestätigt werden, da trotz grober Beschädigung einer Versuchswand (1/2 Stein starke Wand) mit einem Vorschlaghammer (der Putz war an verschiedenen Stellen losgeschlagen) nur eine Abnahme der Schallisolation um 2 db festzustellen war. Auch an einer praktisch ausgeführten Wand war ein Fehlen von ca. 1 m² Putz ohne Einfluß auf ihre Schalldämmung.

[2]) E. MEYER, Elektr. Nachr.-Techn. 12 (1935), S. 393. — CAMMERER und DÜRHAMMER, Gesundh.-Ing. 42 (1934), S. 1.

Trittschall wird durch Gehen, im weiteren Sinne auch durch Rücken von Möbeln u. dgl., ganz allgemein durch stoßartige Erregung als Körperschall in der Decke erzeugt, und im darunter liegenden Raum als Luftschall abgestrahlt.

Zur Bestimmung der Trittschallstärke sind eine Reihe von Meßverfahren und Definitionen angegeben worden, doch sind sie z. T. umständlich, z. T. ungenau.

HOFBAUER[1]) z. B. läßt einen Hammer aus verschiedener Höhe auf die Decke fallen und bestimmt für einen Beobachter unter der Decke die Fallhöhe h_o, die der Reizschwelle des Beobachters entspricht. Als Trittschalldurchlässigkeit wird

$$20 \log G \sqrt{h_o}$$

definiert[2]), wobei G das Gewicht des Hammers in Gramm bedeutet. Die unter der Decke entstehende Lautstärke messen — ebenfalls subjektiv — H. REIHER[3]) und das National Physical Laboratory[4]) in England. Zur Erregung der Decke benutzen sie ein Hammerwerk. Im Bureau of Standards[5]) wird ebenfalls ein Hammerwerk angewandt, doch wird eine andere Definition der Trittschalldämmung angegeben. Ist E_1 und E_2 die durch das Hammerwerk oberhalb bzw. unterhalb der Decke erzeugte Schallenergie, so wird als Trittschalldämmzahl

$$10 \log E_1/E_2$$

angegeben. Diese Festsetzung dürfte den Wirkungen eines an verschiedenen Stellen in der Decke angebrachten Dämmstoffes nicht gerecht werden. Liegt das Material oben auf der Decke, so wird E_1 kleiner sein, als wenn es in der Decke z. B. unter einem Eisenblech liegt, obwohl seine Dämmwirkung sicher ähnlich bleibt. Die Schallschluckung der Versuchsräume wird dabei nicht berücksichtigt. Andere Beobachter[1]) bringen unter der Decke einen Kasten an, bestimmen darin die Schallenergie E_1 und geben als Trittschallstärke

$$10 \log E_1/E_2 \text{ db}$$

an, wobei E_0 der Wert für eine Normaldecke ist. Für den Trittschall ist die Abstrahlung der ganzen Decke maßgebend; ein Teil der Decke kann ein falsches Bild liefern.

Bei den im folgenden angegebenen Untersuchungen wurde als Schallempfänger der oben erwähnte Lautstärkemesser benutzt, der hier gut am Platze ist. Denn beim Trittschall wird ein Geräusch erzeugt, das möglichst entsprechend den Ohrkennlinien bewertet werden soll. Als Trittschallsender diente das von L. KEIDEL konstruierte Hammerwerk des Instituts für Schwingungsforschung (s. Abb. 6). Seine 5 Hämmer bestehen aus 500 g schweren Eisengewichten mit 1 cm Buchenholzauflage, die auf der Unterseite schwach gekrümmt ist. Zum Antrieb dient ein $^1/_{10}$ PS starker Wechselstrommotor, der die Hämmer mit einer Frequenz von ca. 10 Hz auf die Decke fallen läßt. Die Tourenzahl des Motors war für die Messungen genügend konstant. Im folgenden (Tab. 1) ist die Lautstärke unter einer bestimmten Decke in Abhängigkeit von der Anzahl der Hammerschläge je Sekunde angegeben.

Tabelle 1

Frequenz	5	10	15 sec^{-1}
Lautstärke	76	78	80 Phon.

Man sieht, daß die gemessene Abhängigkeit so gering ist, daß Tourenzahländerungen des Motors von 10%, wie sie in der Praxis kaum vorkommen, ohne Einfluß auf das Meßergebnis sind.

Um zu untersuchen, wie sich die Fallhöhe und das Gewicht verschiedener Hämmer auswirkt, wurden an einer bestimmten Decke Messungen bei vier verschiedenen Gewichten (108, 150, 250

[1]) G. HOFBAUER und F. BRUCKMAYER, . . . und schalldichte Decken. Der Österr. Baumeister 2 (1935), S. 386.

[2]) Damit ginge die übertragene Energie prop. $\sqrt{h}$. Siehe dagegen weiter unten S. 30.

[3]) H. REIHER, Über den Schallschutz durch Baukonstruktionsteile, Beih. z. Gesundh.-Ing., H. 11, 1932.

[4]) Acoustical work of the national physical Laboratory, J. acoust. Soc. Amer. 7 (1936), S. 167.

[5]) V. L. CHRISLER und W. F. SNYDER, Recent sound transmission measurement at the National Bureau of Standards, Bur. Stand. J. Res. 14 (1935), S. 749.

[1]) H. KREUGER und J. H. SAGER, Ljudisolering inom byggnader, Ing. Vet. Akad. Handl. Nr. 132, Stockholm 1934.

und 500 g) und bei Fallhöhen von 1—4 cm ausgeführt. Die Buchenholzauflage wurde stets beibehalten. Das Ergebnis ist in Abb. 7 dargestellt. Als Abszisse ist die Hammerenergie (Fallhöhe × Hammergewicht) in logarithmischer Einteilung gewählt. Die Ordinate gibt die Lautstärke in Phon an. Bei den größeren Gewichten zeigt sich — im Gegensatz zur Annahme von HOFBAUER (s. o.) — ein geradliniger

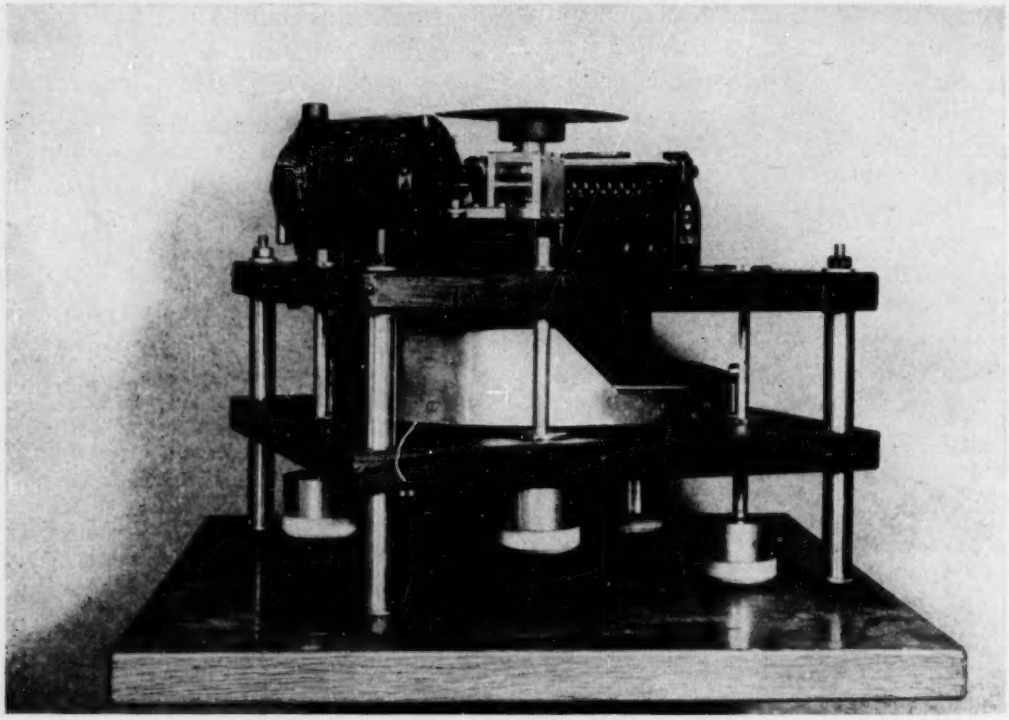

Abb. 6. Trittschallsender des Instituts für Schwingungsforschung

Zusammenhang, nach dem die entstehende Schallstärke proportional der erregenden Energie ansteigt. Die leichteren Hämmer erzeugen eine kleinere Lautstärke als zu erwarten, weil bei ihnen ein merklicher Teil ihrer Energie zur Überwindung der Reibung in den Führungen verbraucht wird.

Auf die im Empfangsraum entstehende Lautstärke wird das Frequenzspektrum des entstehenden Geräusches von Einfluß sein. Um hierüber einen Anhalt zu gewinnen, wurde bei zwei möglichst verschiedenen Decken eine Analyse des entstehenden Trittschallgeräusches vorgenommen. Einmal wurde unter einer weichen Decke (Linoleumbelag), die ein dumpfes Geräusch ergab, ein zweites Mal unter einer harten Decke (Steinfliesen) gemessen. Das Ergebnis ist in Abb. 8 niedergelegt. Die Ordinate gibt für beide Decken den Schalldruck in willkürlichen Einheiten, die Abszisse die Frequenz in logarithmischem Maße an. Während bei der linoleumbelegten Decke der Schwerpunkt des Spektrums bei 300 Hz liegt, wird unter dem Steinfußboden die Trittschallstärke durch Frequenzen um 800 Hz bestimmt. Wegen der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Ohres wird daher unter dem Steinfußboden eine um 27 Phon größere Trittschallzahl (s. w. u.) festgestellt.

Den vorliegenden Untersuchungen wurde folgende Trittschalldefinition zugrunde gelegt. Als Trittschallstärke T wird die Lautstärke bei der Schluckfläche[1]) des Empfangsraumes von 1 m² für den Frequenzbereich von 600—1200 Hz angegeben. Aus der gemessenen Lautstärke

[1]) Sie muß berücksichtigt werden, da sich für leere Zimmer Korrekturen von etwa 6 Phon, für Wohnzimmer von etwa 12 Phon ergaben.

berechnet sich T folgendermaßen: Ist E die der Lautstärke L entsprechende Energiedichte, E_1 diejenige bei der Schluckfläche des Empfangsraumes von 1 m², so ist $E_1 = \frac{AE}{1}$. Bei Vernachlässigung der Unterschiede zwischen Dezibel und Phon ergibt sich

$$T = 10 \log E_1 = L + 10 \log A.$$

T gibt gewissermaßen den Leitwert der Decke an. Je größer also die Trittschallstärke ist, um so schlechter ist die Decke zu bewerten. Zur Erläuterung sei noch hinzugefügt, daß man Gehen mit schweren Halbschuhen (Lederabsätzen) unter der Decke etwa mit einer um 40 Phon geringeren Lautstärke hört, als die Trittschallstärke angibt. Der Einfluß der Flächengröße einer Decke auf ihre Trittschallstärke ist bis jetzt noch nicht untersucht. Die Größe der gemessenen gleichartigen Decken schwankte zwischen 7 und 16 m². Da die Trittschallstärke meist in bewohnten Räumen ermittelt werden mußte, wo die Decken durch Möbel stark belastet sind, wurde versucht, an einigen Decken eine Änderung der Trittschallzahl mit der Belastung festzustellen. Obwohl die Decken bei einem Eigengewicht von ca. 400 kg/m² bis zu 1000 kg belastet wurden, traten nur geringfügige Änderungen der Lautstärke von etwa 1 Phon auf.

Zur praktischen Ausführung der Trittschallmessung wurde das Hammerwerk etwa in Raummitte[1]) angeordnet, während der Mittelwert der Lautstärke im Empfangsraum durch Messung an etwa 4—5 Stellen mit dem Lautstärkemesser ermittelt wurde. Das Schluckvermögen A wurde nach dem oben geschilderten Verfahren mittels des geeichten Schallsenders bestimmt. Die Messungen wurden ebenfalls in den Siedlungen Haselhorst und Hohenschönhausen der Gemeinnützigen Wohnungsbau AG. und in zwei Schulen ausgeführt. Von insgesamt 38 Decken wurde die Trittschallzahl ermittelt. Abb. 9 zeigt das Ergebnis. Es wurde nur in Küchen und Wohnzimmern gemessen, da in den Schlafräumen der Möbelanordnung wegen der Trittschallsender nicht aufgestellt werden konnte. Eine Abhängigkeit der Trittschallzahl

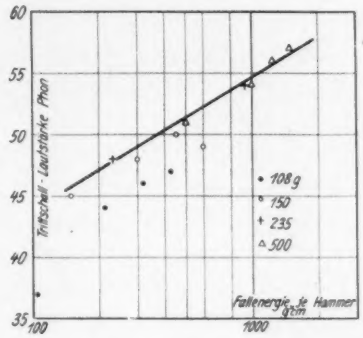

Abb. 7. Die Trittschallstärke in Abhängigkeit von der Hammerenergie

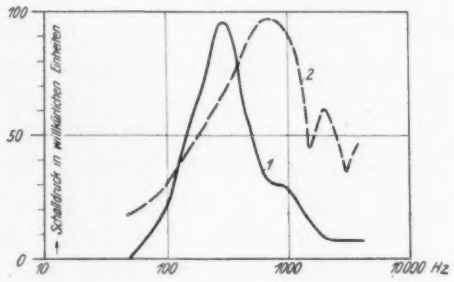

Abb. 8. Schallspektrum des Trittschallgeräusches unter einer linoleumbelegten Decke (1) und unter einer Steinfliesendecke (2)

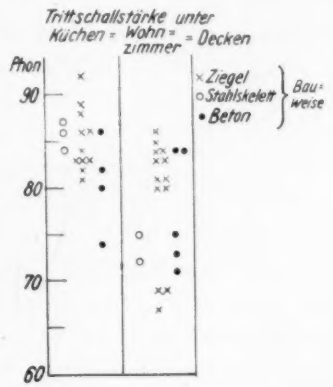

Abb. 9. Trittschallstärke unter Wohnraumdecken für verschiedene Bauweisen

von der Bauweise war nicht festzustellen. Die Trittschallzahlen für die Küchendecken (84 Phon) liegen wegen des Terrakottebelages im allgemeinen höher als für die Wohnzimmer-

[1]) In Vorversuchen wurde ermittelt, daß sich bei verschiedenen Stellungen des Hammerwerkes im Raum Unterschiede bis zu 3—4 Phon ergaben.

decken (79 Phon). Die kleinste Trittschallzahl, also die höchste Trittschallisolation wiesen mit 69 bzw. 67 Phon zwei Steineisendecken 10 cm stark mit 3 cm Druckbeton, 5 cm Schlackenfüllung, 6 cm Schlackenbeton und $5^1/_2$ mm Linoleumauflage im Gesamtgewicht von etwa 400 kg/m² auf.

Körperschallmessungen

Beobachtet man das durch das Trittschallgerät entstehende Geräusch nicht nur in dem unmittelbar darunter liegenden Raum, sondern ein bzw. mehrere Stockwerke tiefer, so erhält man eine größere Lautstärke, als sich aus dem Luftschalldämmwert der Decken errechnet. Die meisten Decken haben eine Dämmzahl von etwa 45—55 db, d. h. das Geräusch müßte auch um denselben Betrag an Lautstärke abgenommen haben. Man stellt jedoch nur Abnahmen von 8—27 Phon fest. Eine Erklärung ist nur folgendermaßen möglich: Durch das Hammerwerk wird in der Decke Körperschall erregt, der sich in der tragenden Konstruktion des Gebäudes fortpflanzt und in den tieferen Stockwerken als erhebliches Geräusch abgestrahlt wird. Auf dieser Tatsache beruht zum größten Teil die starke Hellhörigkeit der modernen Bauten.

Die oben geschilderte Beobachtung wurde dazu benutzt, ein Maß für die Körperschallleitung in Gebäuden zu erhalten.

Der Trittschallsender wird im obersten Geschoß aufgestellt und die Lautstärke in den darunter liegenden Räumen gemessen. Die Abnahme der Lautstärke pro Stockwerk gibt dann ein Maß für die Körperschalleitung des Gebäudes in vertikaler Richtung. So lange die Lautstärke groß genug war, wurde die Intensität des abgestrahlten Luftschalls objektiv festgestellt; bei geringerer Lautstärke wurde mit dem Barkhausen-Geräuschmesser — natürlich unter Zuhilfenahme einer Anschlußmessung — der Körperschall in dem tragenden Mauerwerk gemessen. Ein Ohr lag dabei fest an der Wand, das andere am Telefon. Innerhalb der Genauigkeit des Geräuschmessers (5 Phon) waren die so erhaltenen Werte reproduzierbar und stimmten mit der Anzeige des objektiven Gerätes überein.

Die Messungen wurden in Haselhorst, in einigen staatlichen Bauten und in den verschiedensten Hochhäusern Berlins ausgeführt.

Im allgemeinen war die Lautstärkeabnahme pro Stockwerk in demselben Bauwerk gleichmäßig. Trat irgendwo eine stärkere Abnahme ein, so war stets — oft erst durch mehrfache Rückfragen — festzustellen, daß in dem fraglichen Stockwerk die Konstruktion geändert war: Die Querschnitte des tragenden Gerüstes wurden größer, es war eine stärkere Decke vorhanden od. dgl.

Schon bei den Luft- und Trittschalluntersuchungen in Haselhorst hatte es Schwierigkeiten gegeben, mit je zwei Mietern Meßzeiten zu vereinbaren. Bei den Körperschalluntersuchungen wurde es trotz eifrigster Bemühungen der Siedlungs- und Hausverwaltung nahezu zur Unmöglichkeit. Denn mit der Messung mußten sämtliche Mieter im Hause einverstanden sein, da ja möglichst für alle Stockwerke die Lautstärkeabnahme bestimmt werden sollte. In den Hochhäusern ließen sich die Messungen nach den normalen Dienststunden gut durchführen. Im ganzen ist etwa 60mal die Körperschallabnahme pro Stockwerk in den verschiedensten Gebäuden bestimmt worden.

Im Gegensatz zu den Luft- und Trittschallmessungen zeigte sich bei diesen Untersuchungen eine Abhängigkeit von der Bauweise des Versuchsobjektes. Abb. 10 gibt einige Beispiele dafür. Es ist die Lautstärkeabnahme in Phon je Stockwerk für verschiedene Bauweisen dargestellt. Als Ausgangswert wurde jedesmal die Lautstärke im 1. Stockwerk unter dem Trittschallsender gleich 0 Phon gesetzt. Die geringste Dämmung zeigen Beton und Stahlskelettbauten. Die starke Abnahme bei Kurve 2 vom ersten zum zweiten Stockwerk ist darauf zurückzuführen, daß hier in einem sehr stark gedämpften Raum (Teppichlager) gemessen wurde. Ebenfalls einen starken Sprung zeigt Kurve 3 vom 7. zum 8. Geschoß. Hier hat sich die Konstruktion entscheidend geändert (Querschnittsvergrößerung der tragenden Bauteile). Kurve 5 ist in einem Ziegelbau ermittelt. Die gewöhnliche Bauweise zeigt also eine größere Körperschalldämmung als die Stahlskelett- und die

Betonbauweise. Besonders interessant waren die Untersuchungen, die zu der Kurve 6 führten. Hier wurde in einem Stahlbau in Haselhorst gemessen, der sich angeblich nicht

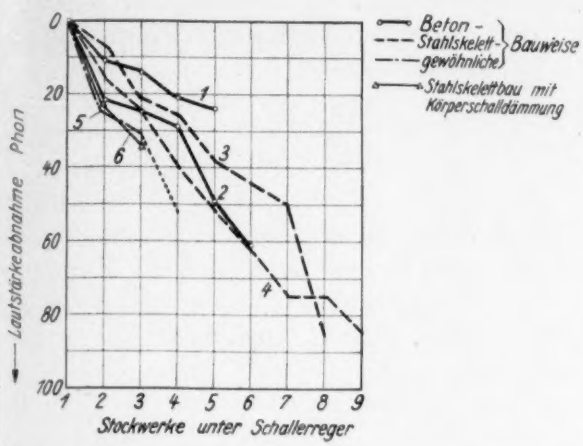

Abb. 10. Körperschallabnahme (Phon/Stockwerk) für verschiedene Bauweisen

von denen unterscheiden sollte, die zu Kurve 3 und 4 führten. Die auftretenden Unterschiede zwischen den Messungen veranlaßten eingehende Nachforschungen und brachten folgendes Ergebnis: An dem Stahlbau in Haselhorst waren doch Körperschalldämmstoffe eingebaut: Abb. 11 zeigt die Einzelheiten der Konstruktion. Das Stahlskelett ist durch 5 mm starke Korkplatten von dem Füllmauerwerk getrennt und dadurch die Körperschalleitung erheblich herabgesetzt worden!

Die Mittelwerte sämtlicher Beobachtungen für die verschiedenen Bauweisen sind im folgenden zusammengestellt. Stark abweichende Werte, für die eine Erklärung gegeben werden kann, sind nicht mit einbezogen.

Bauweise	Mittlere Körperschalldämmung in Phon/Stockwerk
Ziegelbau	19
Beton	8
Stahlskelett	8
Stahlskelett mit Dämmstoff	18

Diese Zahlen zeigen noch deutlicher den Vorteil der Ziegelbauweise (19 gegen 8 Phon). Sie führen jedoch auch klar vor Augen, daß es sehr wohl möglich ist, durch entsprechende Maßnahmen auch bei den modernen Bauweisen ähnliche Dämmwirkungen zu erzielen.

Körperschalluntersuchungen an Gebäuden sind von anderer Seite kaum ausgeführt worden. R. SCHMIDT[1]) hat das Gebäude des Instituts für Schwingungsforschung (Bau aus Hartbrandsteinen) daraufhin untersucht. Der Fußboden im Dachgeschoß wurde mit reinen Tönen angeregt und mit dem Geräuschmesser nach BARKHAUSEN die Lautstärkeverteilung im Gebäude gemessen. Für 800 Hz erhält er eine Dämmung von 12 Phon/Stockwerk, und für 100 Hz 16 Phon/Stockwerk. Für horizontale Ausbreitung — die im Laufe der vorliegenden Untersuchung nicht bestimmt wurde — erhält er im Mittel eine Abnahme von 19 Phon/4 m, also etwa 5 Phon mehr als für die vertikale Ausbreitung. Die Unterschiede zwischen den SCHMIDTschen Messungen und den vorliegenden Untersuchungen sind einmal auf die verschiedenen Versuchsbedingungen (Bau aus Hartbrandsteinen anderes Frequenzspektrum), z. T. wohl auch auf die geringere Genauigkeit derartiger Messungen zurückzuführen.

R. SCHMIDT[1]) hat an Materialproben die Dämpfung für verschiedene Baustoffe festgestellt.

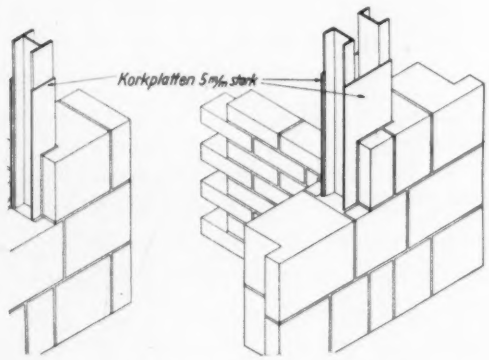

Abb. 11. Schematische Zeichnung eines Stahlbauskeletts mit Körperschalldämmung

Tabelle 2 gibt die mittlere Dämpfung von Biegewellen in db/4 m für den Frequenzbereich von 100—3000 Hz an.

[1]) R. SCHMIDT, Ing.-Arch. 5 (1934), S. 352.

Tabelle 2

Körperschalldämpfung in db/4 m (Frequenzbereich 100—3000 Hz)

Eisen	Ziegel	Beton	Holz
$4—16 \cdot 10^{-2}$	$3{,}6—4 \cdot 10^{-1}$	$2{,}8—8 \cdot 10^{-1}$	$2—3 \cdot 10^{-1}$

Es fällt der große Unterschied zwischen Dämpfungswerten an Materialproben und Bauten auf, auf den schon früher hingewiesen wurde[1]). Er ist auf den Einfluß von Stoßstellen und Querschnittsänderungen zurückzuführen. Das besagt, daß man Körperschallmessungen stets am Bauwerk direkt ausführen muß und nicht, wie beim Luftschall, mit Messungen im Laboratorium auskommen kann.

Auf Grund dieser Untersuchungen an Wohnbauten und aus dem Ergebnis von zahlreichen Umfragen bei den Mietern der Versuchssiedlung Haselhorst können folgende Schallschutzforderungen[2]) für Wohnungstrennwände und Decken vorgeschlagen werden. Dabei sind die Schalldämmessungen nach bestimmten Vorschriften auszuführen.

a) Luftschall

1. Einschalige Wände

Die Luftschalldämmung einer einschaligen Wand aus Hohl- oder Vollziegeln darf für den Frequenzbereich 100—3000 Hz den mittleren Dämmwert von 53 db nicht unterschreiten. Der Forderung genügt eine 1 Stein starke Wand aus Vollziegelmauerwerk mit beiderseitig 1,5 cm Putz (Gewicht etwa 450 kg/m²). Auf eine Messung des Dämmwertes kann verzichtet werden, wenn das Wandgewicht $\geq$ 450 kg/m² ist.

2. Mehrschalige Wände

Bei mehrschaligen Wänden ist für den Frequenzbereich von 100—550 Hz ein mittlerer Dämmwert von 47 db, von 550—3000 Hz ein solcher von 59 db zu verlangen.

Bei mehrschaligen Wänden ist stets eine Messung vorzunehmen, eine Berechnung des Schalldämmwertes aus den Dämmwerten der Einzelschalen ist unzulässig.

[1]) E. Meyer, Z. VDI 32 (1932), S. 957.

[2]) Diese Vorschriften sind dem Deutschen Normenausschuß zur weiteren Bearbeitung (Neufassung von Din 4110) übergeben worden.

3. Decken

Decken sind je nach ihrem Aufbau als ein- oder mehrschalige Wände zu behandeln. Die obigen Forderungen erfüllt eine Holzbalkendecke (Balken ca. 26 cm stark) mit Dielung, 11 cm Lehmschlag, Rohrung und Putz im Gesamtgewicht von 250 kg/m².

Vorschrift zur Messung der Luftschalldämmung[1])

Der Dämmwert wird nach der Beziehung $10 \log_{10} N_1/N_2$ in dezibel (db), gemittelt über den logarithmisch aufgetragenen Frequenzbereich, bestimmt. N_1 bezeichnet dabei die auf die Wand aus allen Richtungen auffallende Schalleistung, N_2 ist die auf der anderen Seite abgegebene Schalleistung.

Die Versuchswand hat die Größe von 2×2 m². Die Untersuchung ist bei mindestens 10 Heultönen (Heulbreite $\pm$ 50 Hz) mit einem Abstand von je einer halben Oktave im Bereich von 100—3000 Hz durchzuführen. Anzustreben ist ein Aufzeichnungsverfahren, das den Dämmwert für alle Frequenzen innerhalb des geforderten Bereichs bestimmt; das Anzeigegerät ist ein Schalldruckmesser.

Erfolgt die Messung zwischen zwei Hallräumen (Volumen von je ca. 100 m³), so sind die Schallempfänger etwa in der Raummitte anzuordnen. Die Schalldämmzahl wird dann

$$D = 20 \log \frac{p_1}{p_2} - 10 \log \frac{A}{F},$$

wobei p_1 und p_2 die Schalldrucke im Sende- bzw. Empfangsraum, A die gesamte Schallschluckfläche des Empfangsraumes und F die Fläche der Versuchswand bedeuten. Die Schallschluckfläche ist durch die Messung der Nachhallzeit zu ermitteln.

Wird als Empfangsraum ein gedämpfter Raum benutzt, so ist der Schallempfänger unmittelbar an der zu prüfenden Wand aufzustellen. Die Schalldämmzahl ist dann

$$D = 20 \log \frac{p_1}{p_2} - 3.$$

[1]) Vgl. hierzu: S.-B. preuß. Akad. Wiss., Physik.-math. Kl. IX, 1931; Elektr. Nachr.-Techn. 12 (1935), S. 393.

Der Schallempfänger darf keine ausgeprägte Richtwirkung haben.

b) Trittschall[1])

Die Trittschallstärke unter einer Decke darf den Wert von 80 Phon nicht überschreiten. Der Forderung genügt eine Holzbalkendecke, Balken rund 26 cm stark, mit Dielung, 11 cm Lehmschlag, Rohrung und Putz im Gesamtgewicht von 250 kg/m².

Vorschrift zur Messung der Trittschallstärke

Die zu untersuchende Decke wird ungefähr in der Mitte mit einem Hammerwerk erregt, dessen 5 Eisenhämmer mit je 1 cm Buchenholzauflage und je 500 g Gewicht aus 4 cm Höhe mit einer Frequenz von etwa 10 Hz auf die Decke klopfen. Bedeuten L die in dem Raum unter der Decke herrschende Lautstärke in Phon und A das Schallschluckvermögen dieses Raumes im mittleren Tonhöhenbereich (etwa 600—1200 Hz), so ist die Trittschallstärke $T = L + 10 \log A$ Phon. Sie ist damit auf einen Empfangsraum von 1 m² Schallschluckfläche bezogen. Die Messung der Lautstärke ist mit einem objektiven Anzeigegerät vorzunehmen.

Normales Gehen auf einer Decke mit 80 Phon Trittschallstärke erzeugt in dem darunter liegenden Raum eine Lautstärke von 20 bis 40 Phon.

Ähnliche Vorschläge wurden auch in anderen Ländern gemacht. In Österreich z. B. weichen zwar die Zahlenwerte von den vorliegenden Vorschlägen auf Grund anderer Definitionen und Meßmethoden ab[1]), doch sind sowohl für Luft als auch für Trittschall die Beispiele, die den Mindestforderungen gerade genügen sollen, dieselben. Denn für Luftschall gibt das OENORM-Blatt die 25 cm starke beiderseitig verputzte Vollziegelmauer, für Trittschall die normale Holzbalkendecke (Balken 18 × 24 cm) an.

[1]) Um die Körperschalleitung über mehrere Stockwerke hinweg herabzusetzen, werden bei Stahlskelett- und Betonbauten solche Dämmaßnahmen empfohlen, daß eine Abnahme der Körperschallenergie von mindestens 20 db je Stockwerk erreicht wird.

Zusammenfassung

Zur Ermittlung der Luftschalldämmzahl von Wänden und Decken in bewohnten Räumen wird ein neues Verfahren angegeben und durch viele Messungen gezeigt, daß die in der Praxis ermittelten Werte mit einer gewissen Streuung mit den Ergebnissen der Laboratoriumsuntersuchungen übereinstimmen. Eine Trittschalldefinition wird gegeben und für eine Reihe von Decken ihre Trittschallstärke angegeben. Die Körperschalldämmung in Phon/Stockwerk in Wohnbauten wird ermittelt und ihr unterschiedlicher Wert für verschiedene Bauweisen festgestellt. Der Einfluß von Körperschalldämmstoffen wird an einem Stahlskelettbau gemessen. Auf Grund der dabei gesammelten Erfahrungen werden Vorschläge zur Normung des Schallschutzes von Wohnungstrennwänden und Decken gemacht.

Die zur Durchführung dieser Untersuchung notwendigen Geldmittel wurden von der Stiftung zur Förderung von Bauforschungen und vom Deutschen Normenausschuß zur Verfügung gestellt. Die beiden Stellen trugen ebenfalls Sorge um den Nachweis der Versuchsobjekte. Dafür sei ihnen auch an dieser Stelle gedankt.

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. Erwin Meyer, der durch seine dauernde Hilfe mit Rat und Tat die Durchführung der Untersuchung stark gefördert hat.

[1]) Für Luftschall sind es z. B. 57 statt 53 db. Beim Trittschall liegt eine andere Definition vor. S. S. 29 unter Hofbauer.

(Eingegangen 10. Juli 1936)

Ein neues Gerät zur periodischen Wiederholung von Schallaufzeichnungen

Von Hans Joachim von Braunmühl

Mit 4 Abbildungen

I.

Für eine ganze Reihe von Zwecken sind Anordnungen erwünscht, welche ein bestimmtes, meist ziemlich kurzzeitiges Schallereignis in gewissen Abständen wiederholen, sei es, daß es sich um sprachliche Darbietungen, Kommandos, Ankündigungen oder musikalische Tonfolgen handelt. Grundsätzlich können hierfür alle Schallaufzeichnungs- und Wiedergabeverfahren verwendet werden, sofern ihre technische Vollkommenheit dem Charakter des Schallereignisses bzw. den Ansprüchen an die Natürlichkeit seiner Wiedergabe genügt.

Bei der Schallplatte z. B. läßt sich der Tonabnehmer nach dem Abtasten einer bestimmten Rillenzahl durch mechanische Vorrichtungen abheben und, gegebenenfalls unter Zwischenschaltung einer Pause, wieder auf den Anfang der Aufzeichnung zurücksetzen. Beim Magnettonverfahren läßt sich ein Band aus Stahl oder einem anderen magnetisierbaren Träger zu einer endlosen Schleife zusammenfügen und bei kontinuierlichem Umlauf abspielen. In entsprechender Weise kann ein lichtelektrisch abtastbarer Filmstreifen behandelt und beliebig langzeitig wiedergegeben werden.

Das Schallplattenverfahren besitzt den Nachteil, daß eine mehr oder weniger ruckartige Bewegung des Tonabnehmers beim Abheben, Zurückschieben und Aufsetzen erforderlich ist. Außerdem sind Schallplatte und Nadel wegen der mechanischen Abnutzung für Dauerbetrieb weniger geeignet. In dieser Hinsicht arbeitet das endlose Stahlband günstiger, da hier nur gleichförmige Bewegungen auftreten. Die Abnutzung durch den Abtastvorgang läßt sich bei Anwendung geeigneter Hörköpfe recht gering halten. Beim lichtelektrischen Verfahren kann sogar eine Abnutzung durch die Abtastung vollständig vermieden werden.

Aus diesem Grunde und auch wegen der erreichbaren hohen Qualität der Lichttonaufzeichnung erweist sich dieses Verfahren für den vorliegenden Zweck als besonders geeignet. Aber auch die Filmschleife ist für starke Dauerbeanspruchung noch nachteilig; der Schichtträger ist Alterungserscheinungen und Biegungsbeanspruchungen unterworfen; die Aufzeichnung selbst wird durch die Antriebsvorrichtung allmählich verschrammt und die Wiedergabequalität verschlechtert sich. Auf Grund dieser Erfahrungen ist das nachstehend beschriebene Gerät entwickelt worden mit dem Ziel, die geschilderten Nachteile zu vermeiden und eine Betriebssicherheit für praktisch unbeschränkte Dauerbeanspruchung zu erreichen.

II.

Es liegt an sich nahe, die Vorteile der lichtelektrischen Abtastung mit denen eines starren Schallträgers nach Art der Schallplatte zu vereinigen. Als Schallträger wird daher eine kreisrunde Glasplatte mit Mittelbohrung von der Form einer Schallplatte gewählt, auf die eine lichtempfindliche Emulsion aufgegossen ist. Diese Platte wird auf einem geeignet abgewandelten Schallplattenaufnahmegerät, welches zweckmäßigerweise mit normaler Schallplattengeschwindigkeit (78 Umdrehungen/Minute) läuft, in der Dunkelkammer unter Verwendung eines der bekannten Lichttonaufzeichnungsgeräte beschriftet. Nach der photographischen

Behandlung erhält man eine spiralförmig verlaufende Lichttonaufzeichnung[1]). In Abb. 1 ist der Ausschnitt einer derartigen Platte verkleinert dargestellt. Der mittlere Teil wird, ähnlich wie bei den Schallplatten, unbenutzt gelassen, da dort die Weggeschwindigkeit der Aufzeichnung für eine einwandfreie Abtastung der hohen Frequenzen zu gering ist. Die gewählte Breite der Tonspur lehnt sich an die in der Tonfilmtechnik gebräuchliche Norm an und

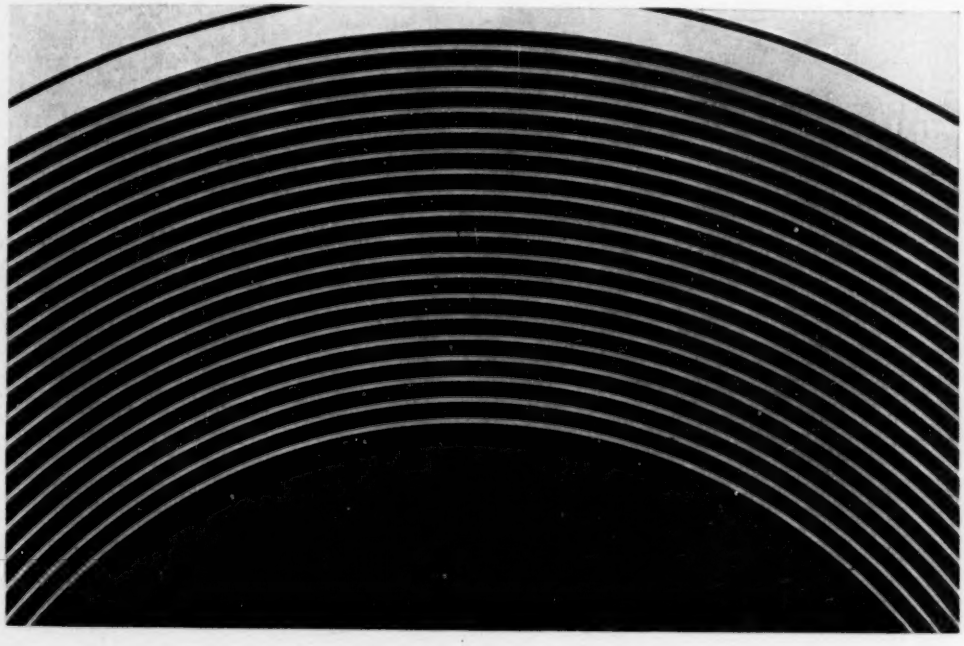

Abb. 1. Ausschnitt aus der spiraligen Lichttonaufzeichnung

beträgt etwa 2,5 mm. Wenn längere Darbietungen aufgenommen werden sollen, läßt sich ohne Vergrößerung des Schallträgers oder Herabsetzung seiner Tourenzahl das Fassungsvermögen einer derartigen Platte durch Verringerung der Tonspurbreite noch erheblich heraufsetzen, allerdings keineswegs bis zu der — für den in Rede stehenden Zweck auch gar nicht erwünschten — Spieldauer einer Schallplatte.

Zur Abtastung einer solchen Aufnahme könnte an sich ein lichtelektrisch abtastender Tonabnehmer verwendet werden, der entsprechend dem Vorschub der Spirale radial über die Aufzeichnungszone der Platte geführt und nach Beendigung der Abtastung, gegebenenfalls unter Zwischenschaltung einer Pause, an den Anfang zurückversetzt wird. Eine solche Vorrichtung würde jedoch die gleichen Nachteile einer oszillierenden Bewegung mit sich bringen, wie sie oben bei der Schallplatte bemängelt worden sind. Die mechanische Bewegung des Lichtspaltes wird daher durch eine optische ersetzt, und zwar in folgender Weise:

Die Tonlampe entwirft über ein optisches System das Bild eines langen, schmalen Spaltes auf den Schallträger und zwar so, daß das durchleuchtende schmale Lichtbündel radial sämtliche Spuren der Spirale durchsetzt. Die Lichtspaltbreite entspricht dabei dem in der Tonfilmtechnik üblichen Wert von etwa 20 μ. Damit nun durch diese Anordnung nicht sämtliche Spiralspuren gleichzeitig durchleuchtet werden, wird zwischen Tonlampe und Schallträger eine langsam rotierende, undurchsichtige Scheibe eingeschaltet, welche mit einer ebenfalls spiraligen Ausfräsung versehen ist (Abb. 2). Die

[1]) Natürlich kann an Stelle der lichtelektrischen Aufzeichnung auch eine mechanische Eingravierung einer lichtelektrisch abtastbaren Tonspur nach Art des „Philips-Miller"-Verfahrens benutzt werden.

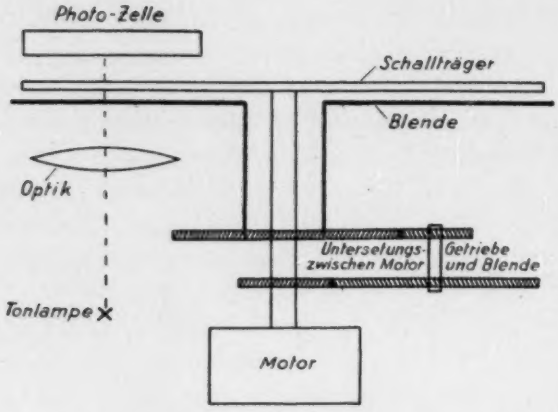

Abb. 2. Grundsätzliche Anordnung des Gerätes

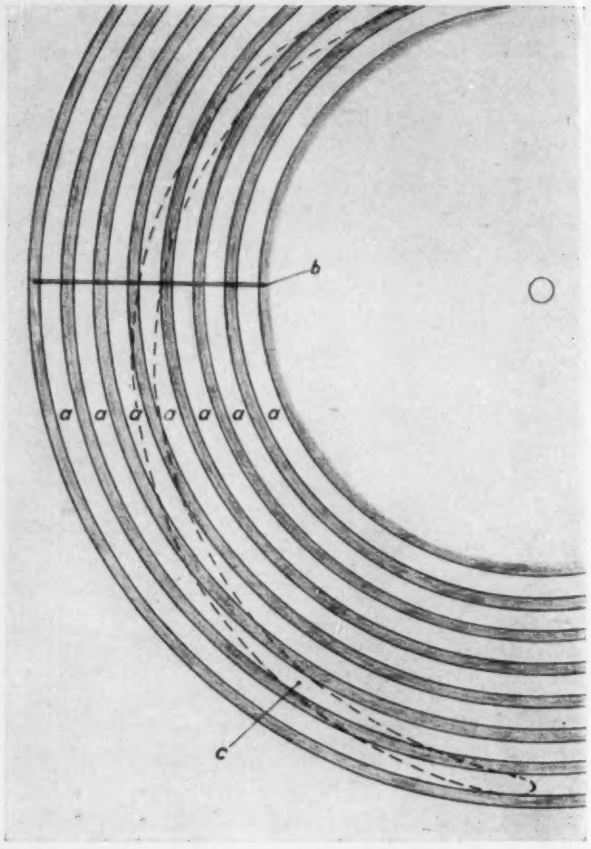

Abb. 3. Prinzipansicht von oben: a) spiralige Tonspur, b) Lichtspalt, c) Ausfräsung der langsam rotierenden Blende (zwischen a und b angeordnet)

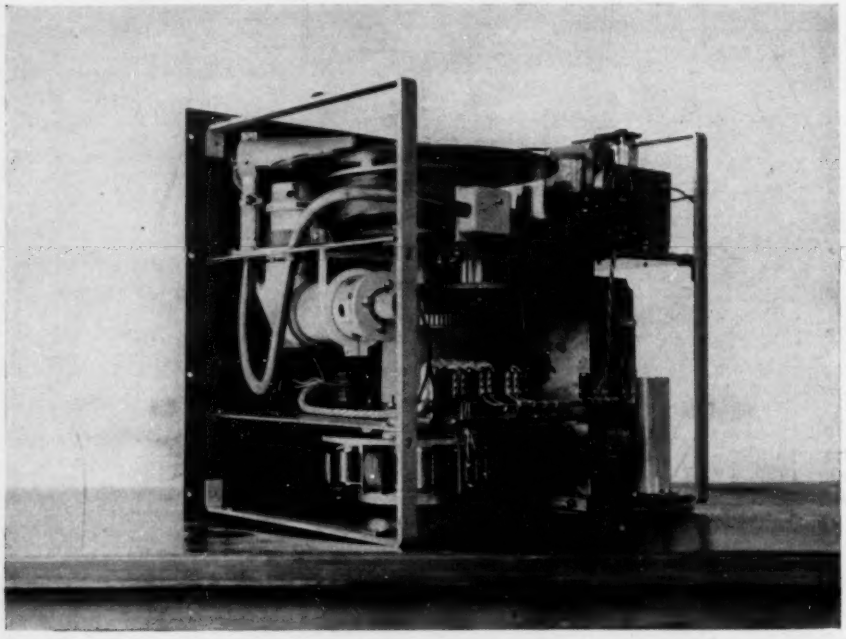

Abb. 4. Rückansicht des fertigen Gerätes

Breite dieser Ausfräsung muß so beschaffen sein, daß aus dem langen Spalt nur ein Stück von der Breite der aufgezeichneten Tonspur, also im vorliegenden Falle etwa 2,5 mm, freigegeben wird (Abb. 3). Die Steigung der spiraligen Blendenausfräsung und die Umdrehungsgeschwindigkeit der Blende müssen so abgestimmt sein, daß der Vorschub des freigegebenen Spaltstückes genau mit dem der Aufzeichnungsspirale übereinstimmt. Es ist leicht einzusehen, daß bei einer flachen Spirale eine verhältnismäßig große, bei einer steilen Spirale eine geringe Blendengeschwindigkeit erforderlich ist. Aus Gründen der mechanischen Festigkeit der Blende empfiehlt es sich, nicht zu flache Spiralen anzuwenden, sondern dafür mehrere Einfräsungen anzubringen. Die Zeit zwischen dem Austritt der ersten Ausfräsung aus dem Lichtstrom bis zum Eintritt der nächsten wirkt als Pause zwischen zwei Wiederholungen des aufgezeichneten Signals.

III.

Aus dem Vorstehenden ergibt sich, daß das beschriebene Gerät nur rotierende Teile besitzt. Die höchste Geschwindigkeit ist die des Schallträgers (78/60 Umdrehungen/sec.). Für seinen Antrieb stehen äußerst dauerhafte Synchronmotoren zur Verfügung, die neuerdings sogar mit Vorrichtungen zum Selbstanlauf verfügbar sind, so daß eine Fernbedienung des Gerätes möglich ist. Die Tourenzahl der Blende liegt je nach der Form ihrer Ausfräsungen verschieden, mindestens aber eine Größenordnung unter der des Schallträgers. Dieser selbst ist entsprechend den Eigenschaften einer photographischen Platte von praktisch unbegrenzter Dauerhaftigkeit. Beanspruchungen irgendwelcher Art treten nicht auf; Alterungserscheinungen sind nicht zu befürchten. Das betriebsfertige Gerät ist in Abb. 4 dargestellt.

Das neue Gerät eignet sich außer für die eingangs erwähnten Anwendungsgebiete besonders als Pausenzeichengeber für Rundfunkzwecke. Hier können mit der gleichen Einrichtung die verschiedensten Motive, musikalische Melodien, Geräusche jeder Art und natürlich auch Sprache wiedergegeben werden. Für diesen Zweck wurden die beschriebenen Geräte erstmalig bei den Rundfunkübertragungen der Olympischen Spiele 1936 eingesetzt.

(Eingegangen 20. Juli 1936)

SCHRIFTTUM

R. N. Ghosh, University of Allabahad, Indien, **Elastic Impact of a Pianoforte Hammer.** J. acoust. Soc. Amer. 7 (1936), S. 254.

Mit Hilfe Heavisidescher Rechenoperationen werden Gleichungen für die Verrückung des Anschlagpunktes und des Druckverlaufs zwischen Hammer und Saite gewonnen. Die Rechnung wird durchgeführt für den Fall, daß der Hammer elastisch ist und an einem Punkt der Saite angreift, der näher dem einen Saitenende liegt, also so, wie es in der Praxis der Fall ist. Außerdem soll die Berührungsdauer zwischen Hammer und Saite gegen die längste Schwingungsdauer der Saite klein sein. Für die Verlagerung y_0 des Anschlagpunktes wird ein additiver Ausdruck gewonnen, dessen erstes Glied dem von Kaufmann berechneten gleich ist. Das zweite Glied besteht aus einer Summe von stark gedämpften Größen. Auch für den Druckverlauf ergibt sich ein Ausdruck, dessen erster Summand wie oben gleich dem von Kaufmann ist und dessen zweiter aus periodischen Gliedern besteht, mit Perioden der Länge $T = 2\,a/c$, $4\,a/c$, $6\,a/c$ usw., wobei a das kurze Saitenende und c die Wellengeschwindigkeit längs der Saite bedeutet. Der Druckverlauf ist also wie bei früheren Untersuchungen (z. B. Das, Proc. Ind. Ass. 7 (1921), S. 13) unstetig und zeigt Maxima, wenn die von den Enden reflektierten Wellen wieder am Berührungspunkt ankommen. Die Unstetigkeiten sind desto größer, je k einer die Dämpfungen der Glieder des zweiten Summanden werden. Wenn die Glieder höherer Ordnung bei großer Dämpfung verschwinden, wird der Druckverlauf stetiger. Dies ist der Fall bei weichem Hammerfilz.

Im zweiten Teil der Arbeit wird die Verrückung y_0 des Anschlagpunktes unter Berücksichtigung der von den Enden reflektierten Wellen berechnet. Es werden additive Ausdrücke gewonnen, die gültig sind für $O<t<2\,a/c$, $2\,a/c<t<4\,a/c$ usw.

Lottermoser

The Calibration of Microphones. Subcommitee on Fundamental Sound Measurements (Received December 20, 1935). J. acoust. Soc. Amer. 7 (1936), S. 300.

Das Subcommitee on Fundamental Sound Measurements, ein Unterausschuß der „American Standards Association", gibt hier einen zusammenfassenden Bericht über Mikrophone und Mikrophoneichungen, der sich im wesentlichen auf kohlefreie Mikrophone bezieht.

1. Mikrophone. Als wichtigste Eigenschaften werden Frequenzkurve, Nichtlinearität und Richtungscharakteristik angeführt. Bei den Frequenzkurven wird unterschieden zwischen der Frequenzkurve im freien Schallfeld (Field response) und der Druckkammerkurve (Pressure response). Es wird empfohlen, Mikrophon-Frequenzkurven stets durch den Quotienten Volt/Druck anzugeben, auch wenn es sich nicht um Druckempfänger handelt.

2. Mikrophoneichung. Der zweite Teil enthält sämtliche praktisch benutzten Methoden zur relativen und absoluten Eichung von Mikrophonen. Es werden besprochen: Thermophoneichung, elektrostatische Kompensationsmethode, elektrostatische Hochfrequenzmethode, elektrostatische Eichung mit Hilfselektrode und Eichung mit der Rayleighschen Scheibe. Die Arbeit enthält eine große Zahl von Literaturangaben.

Heinrich Kösters

C. J. Christensen und G. L. Person, **Spontaneous Resistance Fluctuations in Carbon Microphones and Other Granular Resistances.** Bell Syst. techn. Journ. (XV), 2 (1936), S. 197.

Das Rauschen von körnigen Widerständen (Kohlemikrophon, Kohle-Hochohmwiderstand, durch Zerstäubung gewonnene Metallfolie), das bei einer angelegten Gleichspannung auftritt, entsteht durch plötzliche, völlig unregelmäßig verlaufende Schwankungen des Widerstandswertes. Zur Aufklärung dieser Zusammenhänge wird die mittlere quadratische Rauschspannung $\overline{V_c^2}$ in verschiedenen Abhängigkeiten gemessen. Dabei ergeben sich die empirischen Beziehungen:

$$\overline{V_c^2} \sim V_{=}^{\alpha}$$
$$\sim R^{\beta}$$
$$\sim \log \frac{F_2}{F_1},$$

oder zusammengefaßt:

$$\overline{V_c^2} = K \cdot V_{=}^{\alpha} \cdot R^{\beta} \cdot \log \frac{F_2}{F_1}.$$

Darin sind $V_{=}$ die an R liegende Gleichspannung, $\alpha \approx 1{,}85$ und $\beta \approx 1{,}25$ zwei Konstanten, F_2 und F_1 die Grenzen des betrachteten Frequenzbereiches. In der Konstanten K äußern sich Abmessungen und Material des Widerstandselementes sowie auch der an sich ziemlich geringe Einfluß der Temperatur und des umgebenden Mediums:

$K \approx 1{,}2 \cdot 10^{-10}$ für einen einzelnen Kohlekontakt,
$\approx 1{,}3 \cdot 10^{-11}$ für ein normales Kohlemikrophon,
$\approx 1{,}1 \cdot 10^{-21}$ für einen Hochohmwiderstand von $10^5\ \Omega$.

Die durch $\beta = 1{,}25$ dargestellte Abhängigkeit der Rauschspannung von der Größe des Widerstandes R gilt nur dann, wenn dieser durch den Kontaktdruck verändert wird. Ändert er sich jedoch durch Vergrößerung oder Verkleinerung der Kontaktzahl, so wird $\overline{V_e^2} = \text{const} \cdot R$, d. h. $\beta = 1$, wie eine theoretische Berechnung von Reihen und Parallelschaltungen sowohl einzelner Kontakte als auch ganzer Kontaktgruppen (Widerstandszellen) in guter Übereinstimmung mit den entsprechenden Messungen zeigt.

Ein auf das Kohlemikrophon auftreffender Schall erzeugt eine Wechselspannung $V_\sim$, die zur angelegten Gleichspannung $V_=$ proportional ist: $V_\sim^2 \sim V_=^2$. Da andererseits für die Rauschspannung $V_e^2 \sim V_=^{1{,}85}$ gilt, so kann das Rauschen seine Ursache nicht in dem Mechanismus der regulären Widerstandsmodulation haben. Daraus ergibt sich folgende Hypothese: Es existieren zwischen den einzelnen Körnern des Widerstandes Stellen „primärer Berührung", die den Hauptanteil des Stromdurchganges vermitteln, und Stellen „sekundärer Berührung", die die Stellen primärer Berührung ringförmig umgeben und durch die nur ein sehr kleiner Teil des Stromes fließt. An den primären Berührungsstellen entsteht die reguläre, von der angelegten Gleichspannung unabhängige Widerstandsmodulation, d. h. sie bewirkenden Mikrophoneffekt. Die sekundäre Berührung dagegen verursacht die unregelmäßigen Widerstandsschwankungen, die für das Rauschen verantwortlich sind und die, wie die Abweichung der Exponenten 1,85 und 2 beweist, in geringem Grade von der angelegten Gleichspannung abhängen.

Eine Annahme über Lage, Größe und Verteilung der Leitfähigkeit der Flächen sekundärer Berührung gestattet, den experimentell ermittelten Exponenten β auch rechnerisch mit befriedigender Annäherung herzuleiten. Schließlich lassen es weitere Annahmen über die Auswirkung thermischer Energie und des Gleichverteilungssatzes bei der Energieverteilung möglich erscheinen,auch den Exponenten α und die gefundene Frequenzverteilung theoretisch zu begründen. E. Thienhaus

Robert H. Gault, **Recent Developments in Vibro-Tactile Research.** J. Franklin Inst. (221), 6 (1936), S. 703.

Da sowohl das Hören als auch die Vibrationsempfindung sinnliche Wahrnehmungen mechanischer Schwingungen sind, lassen sich mit dem Vibrationssinn eine Reihe von Versuchen durchführen, die den aus der physiologischen Akustik bekannten ähnlich sind.

1. Bei der Wahrnehmung eines Vibrationsvorganges, z. B. eines gesprochenen und sodann geeignet verstärkten und einem Vibrationssystem zugeführten Satzes, ist die Versuchsperson zunächst darauf beschränkt, den Intensitätsverlauf niederzuschreiben, und es ist möglich, nach einiger Übung gut reproduzierbare Satzprofile aufzuzeichnen. Auf praktische Anwendungsmöglichkeiten weist die Tatsache hin, daß die Verständlichkeit für einen Tauben, der die Sprache von den Lippen ablesen muß, durch Zuhilfenahme eines Vibrationstastgerätes um etwa 20 v. H. erhöht wird.

2. Durch eine „zweiohrige" Übertragungsanlage, bestehend aus zwei Mikrophonen mit 16 cm Abstand im Senderaum, zwei Verstärkern und zwei Vibrationstastgeräten (eines für die rechte, eines für die linke Hand) im Empfangsraum, läßt sich recht gut eine Richtungsempfindung vermitteln. Ein Versuch, bei dem an Stelle eines sich um die Mikrophone herum bewegenden Sprechers lediglich die Intensität eines Summertones in den beiden Tastgeräten geändert wurde, zeigt, daß die Verschiedenheit der Intensität an der rechten und linken Hand das Hauptkriterium für die Richtung ist. Messungen über die Bedeutung von Frequenz, Phase und Zeitdifferenz stehen noch aus.

3. Bekanntlich nimmt die Fähigkeit, Vibrationen wahrzunehmen, mit steigender Frequenz außerordentlich stark ab. Wenn man jedoch die höheren Frequenzen mit sehr viel größerer Energie erregt, läßt sich der Verlauf der Vibrationsempfindungsstärke in Abhängigkeit von der Frequenz ebenso gestalten wie die Ohrempfindlichkeitskurve (aufgenommen bei gleicher Schallintensität), d. h. man kann die „Kurven gleicher Lautstärke" für die Vibrationsempfindung analog nachbilden. Allerdings müßte der Verstärkungsgrad eines für diesen Zweck geeigneten Verstärkers im Bereich von 60—4000 Hz um etwa 85 db ansteigen, eine Bedingung, die bei der benutzten Meßapparatur noch nicht ganz erfüllt werden konnte.

4. Der Verdeckungseffekt äußert sich in ähnlicher Weise wie beim Hörschall: die tieferen „Töne" haben die größere Verdeckungskraft. Man kann die durch eine einfache Vibration (z. B. 128 Hz) hervorgerufene Reizung nur dann von derjenigen einer zweifachen Vibration (z. B. 128 Hz + 1024 Hz) unterscheiden, wenn der höhere „Ton" um 10 db stärker ist als der tiefere, zuzüglich selbstverständlich der wesentlich größeren Verstärkung, die jener sowieso gemäß der Kurve gleicher Vibrationsempfindungsstärke (vgl. 3) erfahren muß. Und zwar erfolgt die Unterscheidung nur durch die Intensität, da die Tastorgane selbst nach bisheriger Erfahrung Frequenzunterschiede nicht feststellen können; die Fähigkeit, trotzdem Vibrationen unter Umständen der Frequenz nach zu unterscheiden, muß auf einer zentralen Nervenfunktion beruhen.

Es ist fernerhin geplant, den Einfluß von Druck und Berührungsfläche zwischen Tastorgan und Vi-

brationsgerät, sowie auch die mit der Vibrationsreizung verbundenen Nervenvorgänge zu untersuchen. E. THIENHAUS

HERBERT GROVE DORSEY, **The Transmission of Sound Through Sea Water.** J. acoust. Soc. Amer. 7 (1936), S. 287.

In einer früheren Arbeit (J. acoust. Soc. Amer. 3 (1932), S. 428) hatte der Verfasser u. a. festgestellt, daß die Schallausbreitung im Seewasser nicht durch vielfache Reflexionen erfolgen könne, sondern daß hier ähnliche Übertragungsverhältnisse herrschen wie beim Luftschall. Eine häufig beobachtete Erscheinung ist jedoch durch dieses Ergebnis nicht erklärbar: Diesseits einer Untiefe kann man den Schall eines jenseitigen, sehr weit entfernten Senders unter Umständen viel kräftiger empfangen als den eines näher gelegenen. Deshalb wurden neue Untersuchungen vorgenommen. Ein Vermessungsschiff I, dessen Geschwindigkeit mit größtmöglicher Genauigkeit gemessen wird, entfernt sich von einem zweiten, ruhig im Wasser treibenden Schiff II und läßt in gleichen Zeitabständen, z. B. alle 30 Sek., unter dem Meeresspiegel Bomben explodieren. Der Schall wird vom Schiff II in verschiedener Tiefe (bis zu 1500 m) empfangen, auf drahtlosem Wege zum Schiff I zurückgeleitet und dort zusammen mit der Explosion selbst aufgezeichnet. Bei den an der Ost- und Westküste Nordamerikas durchgeführten Meßreihen, die sich bis zu Entfernungen von über 40 km erstreckten, wurde der Schall teils in gleichmäßig tiefem, teils von tiefem nach flachem, teils von flachem nach tiefem Wasser übertragen. Entgegen der aus der ersten Arbeit gezogenen Schlußfolgerung beobachtete man jedoch neben dem direkten Schall bis zu 4 Reflexionen; bei größeren Entfernungen treffen sogar nur noch reflektierte Wellenzüge ein. Die Streuung der Meßpunkte im Vergleich zu den theoretischen Zeitdifferenzen, die auf Grund der Temperatur- und Salzgehaltschichtung des betreffenden Gebietes berechnet werden konnten, hält sich, wenn man insbesondere die sehr schwierigen Versuchsbedingungen berücksichtigt, in durchaus annehmbaren Grenzen, womit die Annahme von vielfachen Reflexionen bei der Schallübertragung im Seewasser gut gestützt wird. Die Beobachtung, daß der akustische Widerstand im warmen Wasser größer ist als im kalten, konnte bestätigt werden. E. THIENHAUS

V. O. KNUDSEN und L. OBERT, **The Absorption of High Frequency Sound in Oxygen Containing Small Amounts of Water Vapor or Ammonia.** J. acoust. Soc. Amer. 7 (1936), S. 249.

Bei einer großen Zahl mehratomiger Gase mißt man Schalldämpfungen, die ein Vielfaches der Werte betragen, die man auf Grund von innerer Reibung und Wärmeleitung zu erwarten hätte. Schuld an dieser außerklassischen Absorption ist die endliche Einstelldauer der Schwingungsenergie. Im Schallfeld wird also das thermische Gleichgewicht der Schwingungs-Freiheitsgrade nicht erreicht und Schallenergie nicht umkehrbar in Wärme übergeführt. Theoretische Überlegungen von H. O. KNESER (Ann. 16 (1933), S. 337, Ann. 21 (1933), S. 682, J. acoust. Soc. Amer. 5 (1933), S. 122) zeigen, daß der Koeffizient der molekularen Schallabsorption, der aus der gewöhnlich definierten Absorptionskonstante durch Multiplikation mit der Wellenlänge entsteht, in Abhängigkeit von der Frequenz einen Größtwert durchläuft. Dies ist dann der Fall, wenn die Einstelldauer der Schwingungsenergie, oder, molekularkinetisch betrachtet, wenn die mittlere Lebensdauer des Schwingungsquants ungefähr gleich dem Kehrwert der Schallfrequenz wird. Die Lebensdauer des Schwingungsquants läßt sich durch kleine Zusätze von Fremdgasen stark verkürzen, was einer Verschiebung der größten Schallabsorption nach höheren Frequenzen gleichkommt.

V. O. KNUDSEN untersuchte in einer früheren Arbeit (J. acoust. Soc. Amer. 5 (1933), S. 112) die Schallabsorption von Luft, Sauerstoff und Stickstoff nach einem Nachhallverfahren bei Hörschall von 500 bis 11 000 Hz. Eingehende Messungen über den Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeit wurden gemacht. In einer späteren Arbeit (J. acoust. Soc. Amer. 6 (1935), S. 199) wurde die Schallabsorption in Sauerstoff nach dem gleichen Verfahren und in demselben Frequenzgebiet bei einer großen Zahl gasförmiger Verunreinigungen gemessen, um Aufschlüsse über den Vorgang bei molekularen Zusammenstößen und Reaktionen zu gewinnen. Die neueste Veröffentlichung beschränkt sich auf die Untersuchung von Sauerstoff mit Beimengungen von Wasserdampf oder Ammoniak, dehnt aber den Frequenzbereich ins Ultraschallgebiet bis 34 kHz aus. Wegen der kleinen Nachhallzeiten und des Ausschwingens der Schallquelle ist der Übergang zu einem neuen Meßverfahren nötig. Die Schallabsorption wird nun aus der Energiedichte im diffusen Schallfeld einer kubischen Kammer bestimmt. Als Schallquelle dient ein selbsterregter Magnetostriktionsstab, als Empfänger ein Kristallmikrophon. Ein Schallrührwerk soll Resonanzen des Gasraumes verhindern. In die Messung geht außer der Gasabsorption die Wandabsorption der Kammer und die Leistung der Schallquelle ein. Da die abgestrahlte Leistung nicht gemessen werden kann, sind nach dem Intensitätsverfahren nur Verhältniswerte der Schallabsorption zu gewinnen. Bei verunreinigten Gasen, wie sie hier vorliegen, lassen sich auch Absolutwerte angeben, falls die Absorption des reinen Gases als bekannt vorausgesetzt wird. Für reinen Sauerstoff übernimmt der Verf. die Absorptionskonstante aus früheren Mes-

sungen. Ebenso wird die Größe der Wandabsorption aus Messungen bei Hörfrequenz extrapoliert. Der Fehler, der hierdurch in die Absolutwerte der Schallabsorption eingeht, wird auf 10% abgeschätzt. Als stärkste Fehlerquelle von vielleicht 25% wird ein unvollständig diffuses Schallfeld angeführt. Die Messungen ergeben, daß die Frequenzlage größter molekularer Absorption ungefähr linear mit dem Ammoniakgehalt, dagegen im wesentlichen quadratisch mit dem Wasserdampfgehalt des Sauerstoffs ansteigt. Das spricht dafür, daß für die Umwandlung von Schwingungs- in Bewegungsenergie der Zusammenstoß von einem Sauerstoffmolekül mit zwei Wassermolekülen am wirksamsten ist. Eine verbesserte empirische Formel der Frequenzabhängigkeit wird angegeben. Die Meßergebnisse nach dem neuen Verfahren bestätigen und erweitern den früheren Befund. Sie stützen die Knesersche Absorptionstheorie, wenigstens in ihrer Anwendung auf Sauerstoff. Der Verf. stellt zum Schluß weitere Messungen an anderen Gasen in Aussicht.

Schmidtmüller

J. S. Parkinson und P. O. Young, **A Technique for Studying the Efficiency of Panel Damping Materials.** J. acoust. Soc. Amer. 7 (1936), S. 281—286.

Metallplatten und -bleche können großen Lärm erzeugen, wenn sie durch Stoßen oder Schütteln zu Schwingungen angeregt werden. Diese Schwingungen kann man dämpfen, indem man die Platten mit Überzügen aus geeigneten plastischen Stoffen versieht. Das ist besonders im Fahrzeugbau üblich. Die Verf. geben ein Verfahren an, nach dem man die Wirksamkeit solcher dämpfender Belage exakt prüfen kann.

Meßanordnung. Eine Stahlplatte (Abmessungen etwa 60 × 80 × 0,1 cm³) wurde zwischen zwei eisernen Rahmen mit Holzbacken in wohldefinierter Weise eingespannt und an Seilen aufgehängt.

Versuche, Messungen an stationären erzwungenen Schwingungen der Platte auszuführen, scheiterten an der mangelhaften Reproduzierbarkeit der Anregungsbedingungen. Die Platte wurde daher durch einen Schlag zu freien Schwingungen angeregt, der von einer pendelartig aufgehängten Kugel ausgeübt wurde.

Die ganze Anordnung war im gedämpften Raum aufgebaut. Der abgestrahlte Schall wurde durch ein Mikrophon aufgenommen und konnte wahlweise einem Oszillographen oder einem Bandfilter mit Dezibelmesser zugeführt werden. Mit dem Oszillographen wurde das logarithmische Dekrement der abklingenden Plattenschwingungen ermittelt und mit dem Bandfiltergerät die Schallstärke in dem Spektralbereich von 0—8000 Hz, und in drei Teilbereichen hiervon. Die Einschwing- und Ablesezeit des Bandfiltergerätes war im Verhältnis zur Abklingzeit der Plattenschwingungen (1—10 *s*, bezogen auf 10^{-3} der Anfangsamplitude) klein genug, um eine rohe Frequenzanalyse in dieser Weise zu ermöglichen.

Änderungen der Mikrophonstellung, der Schlagstelle und der Schlagkraft hatten keinen großen Einfluß auf die Ergebnisse. Wichtig hingegen war eine gleichmäßige, reproduzierbare Einspannung der Platte.

Ergebnisse. Die Stahlplatte wurde mit verschiedenen dämpfenden Belägen versehen und deren Einfluß auf die gesamte Schallstärke der Plattenschwingungen, auf ihre spektrale Verteilung und ihr logarithmisches Dekrement untersucht.

Es zeigte sich, daß Hand in Hand mit der Vergrößerung des logarithmischen Dekrements eine Verminderung der Gesamtschallstärke geht. Die Dekremente der geprüften Platten lagen zwischen etwa 0,02 und 0,8. Diesen Grenzen entsprach ein Unterschied in der Gesamtschallstärke von etwa 25 db. Die dämpfende Wirkung der Beläge erstreckt sich hauptsächlich auf die hohen Frequenzen.

Mit wachsender Schichtdicke des Belages wächst das logarithmische Dekrement stärker als linear an.

Schließlich ließen die Verf. noch von 16 Beobachtern 6 verschieden behandelte Platten auf Grund ihres subjektiven Urteils der Güte nach, d. h. also nach abnehmenden Lautstärken, ordnen. Die Ergebnisse sämtlicher Beobachter stimmten untereinander und mit dem objektiven Befund überein.

A. Schoch

F. M. Osswald, Zürich, **Method of Measuring Sound Isolation, in Particular of Impact Sound.** J. acoust. Soc. Amer. 7 (1936), S. 261—264.

In der Arbeit wird ein einfaches Verfahren zur Messung von Luftschall- und Körperschalldämmung in Gebäuden beschrieben.

Für beiderlei Messungen wird ein einziges Gerät verwendet, nämlich ein Hammerwerk mit veränderlicher Fallhöhe, das als Schallsender dient. Der Empfänger ist das menschliche Ohr.

Das Hammerwerk arbeitet zur Körperschallerzeugung unmittelbar auf den zu untersuchenden Bauteil (z. B. eine Decke). Um Luftschall zu erzeugen, läßt man es auf eine Bakelit-Platte arbeiten. Körperschallübertragung auf die Umgebung wird dabei durch ein untergelegtes Gummikissen verhindert.

Der Meßvorgang besteht darin, zu beobachten, bei welcher Fallhöhe die Hammerschläge eben noch hörbar sind, d. h. also entweder von den vorhandenen Störgeräuschen eben nicht mehr verdeckt werden, oder — bei völliger Stille — eben die Hörschwelle des Beobachters überschreiten. Um diese Beobachtung möglichst leicht zu gestalten, ist das Hammerwerk so gebaut, daß seine Fallhöhe von Schlag zu Schlag sich selbsttätig ändert, und zwar periodisch zwischen

einem Minimum und einem Maximum. Der Beobachter hat nur zu zählen, wieviel Schläge einer Periode hörbar sind. Die Zahl der hörbaren Schläge ist unmittelbar ein Maß für die Schallstärke (richtiger: die Lautstärke) der sonst noch vorhandenen Geräusche.

Das Schlaggeräusch enthält praktisch alle Hörfrequenzen. Daher können in geschlossenen Räumen keine störenden Schwankungen der Schallstärke durch Interferenzerscheinungen auftreten, und der Standort des Beobachters hat keinen großen Einfluß auf das Meßergebnis.

In der Anordnung für Luftschallerzeugung kann das Gerät mit Hilfe eines Lautstärkemessers im üblichen Phonmaßstab geeicht werden. (In diese Eichung gehen die Schallschluckeigenschaften des Raumes ein, in dem das Hammerwerk arbeitet. Sie gilt also streng genommen nur für einen bestimmten Raum.) Bei der beschriebenen Ausführung des Gerätes umfaßt eine Periode etwa 60 Schläge. Die Fallenergie bewegt sich zwischen etwa 1 und 1000 gcm Der entsprechende Lautstärkebereich reicht nach der mitgeteilten Eichkurve von etwa 17—78 Phon.

Die Luftschalldämmung zwischen zwei Räumen wird in folgender Weise gemessen: Der Beobachter stellt sich in einem der Räume auf und läßt das Hammerwerk einmal in seinem Raum, und einmal in dem anderen Raum arbeiten. Die Zahl der hörbaren Schläge mißt im ersten Fall die Lautstärke L_B (Phon) der im Beobachtungsraum vorhandenen Störgeräusche, im zweiten Fall die Lautstärke L_S, die der Schallsender im anderen Raum erzeugen muß, damit im Beobachtungsraum ebenfalls die Lautstärke L_B entsteht. Als Schalldämmwert definiert der Verf. den Lautstärkeunterschied $L_S - L_B$. Dies ist ein gewisser Mittelwert über alle Frequenzen, die der Schallsender erzeugt. (Der so definierte Schalldämmwert hängt nicht nur von den schalldämmenden Eigenschaften der Konstruktion ab, sondern auch vom Schallschluckvermögen der Räume und der Fläche der Trennwände. Diesen Einflüssen müßte durch eine entsprechende Korrektion Rechnung getragen werden).

Bei der Messung der Körperschalldämmung zwischen einem Bauteil und einem Raum arbeitet das Hammerwerk unmittelbar auf den Bauteil. In dem Raum wird die Zahl der hörbaren Schläge beobachtet. Der Störpegel ist dabei auf 25 Phon genormt. Der Anzahl hörbarer Schläge entspricht eine bestimmte Mindestfallenergie. Als Körperschalldämmwert wird der zehnfache Logarithmus dieser Mindestfallenergie (gemessen in gcm) vorgeschlagen. A. Schoch

H. L. Kirke und A. B. Howe, **The acoustical design of broadcasting studios.** J. Instn. electr. Engr. 78 (1936), S. 404.

Die vorliegende Arbeit bringt eine Zusammenstellung aller Erfahrungen, die beim Bau von Rundfunksenderäumen seitens des englischen Rundfunks gemacht wurden. In einer historischen Einleitung wird dargelegt, daß der Raumakustik dieser Räume erst Bedeutung geschenkt wurde, als man bemerkte, daß in dem über das Mikrophon abgehörten Schall der Nachhall stärker in Erscheinung trat. (Nach Ansicht der Verfasser spielt für die subjektive Nachhallwirkung der Frequenzgang der Mikrophone für verschiedene Richtungen eine ausschlaggebende Rolle.) Die Räume wurden zunächst sehr stark gedämpft, und zwar ausschließlich mit Stoffbehängen, was diesen Räumen das bekannte Fehlen hoher Frequenzen ohne Schwächung der tiefen gab. Dies machte sich sehr bald für musikalische Darbietungen nachteilig bemerkbar, während es für ausgesprochene Sprechräume lange beibehalten wurde, wobei man das Mikrophon möglichst dicht an den Sprecher heranbrachte. Dadurch entsteht aber eine große Abhängigkeit von der Kopfhaltung des Sprechenden, die überdies noch verstärkt wird, wenn das Mikrophon sehr gerichtet ist. Aber auch das Gegenteil, die ausgesprochene Bevorzugung der hohen Frequenzen und die Schwächung der tiefen durch mitschwingende Platten führt zu unbefriedigenden Ergebnissen. Nach Ansicht der Verfasser soll die Nachhallzeit in Tiefe- und Mittellage etwa gleichbleiben (eher darf sie nach der Tiefe hin anwachsen) und in diesem Bereich etwa den von Watson für verschiedene Raumgrößen angegebenen günstigsten Wert aufweisen, dagegen soll sie nach der Höhe hin abfallen. Die diesen Forderungen entsprechende Frequenzabhängigkeit erhielt man mit 2,5 cm starkem Filz, welcher mit Packpapier und darüber Tapete abgedeckt wurde. (Zwischen 150—3000 Hz, Schluckgrad 30—40%.)

Zur Messung des Schluckvermögens der verschiedenen Auskleidungsstoffe wurden Nachhallversuche in kleineren Räumen ($8{,}3 \times 6 \times 4$ m³ und später $8{,}3 \times 4{,}3 \times 3{,}3$ m³) ausgeführt. Zur Nachhallmessung wurde das bekannte objektive Verfahren verwendet, bei welchem eine Uhr gleichzeitig mit der Abschaltung des Tons elektrisch eingeschaltet und nach Unterschreitung eines Schwellenwertes von der elektrischen Empfängerapparatur wieder abgeschaltet wird. Das Verhältnis des Schwellenwertes zum Anfangsschall wurde durch ein geeichtes Schwächungsglied eingestellt. Zur Vermeidung von stehenden Wellen wurden Heultöne verwendet. Bei der Auswertung wurde die Millingtonsche Formel zugrunde gelegt, welche aus den einzelnen schallschluckenden Oberflächen das geometrische Mittel nimmt. (Diese führt bekanntlich zu wesentlich niedrigeren Schluckgraden als die Eyringsche Formel.) — Sehr ausführlich werden die Resonanzerscheinungen in Räumen behandelt. Das häufig beobachtete Mitschwingen der Decken wird an Oszillogrammen des elektrischen Schwingungskreises, der durch exponentiell anwachsende oder abfallende Wechselspannun-

gen erregt wird, anschaulich gemacht. Decken, deren Eigenfrequenzen schwächer gedämpft sind als die Räume, wirken nach Abschaltung der Schallquelle als langsam abklingender Sender und ergeben somit eine scheinbare Vergrößerung des Nachhalls gegenüber einer starren Decke. Doch kann dieses Verhalten nicht mit den Nachhallerscheinungen der SABINEschen Theorie verglichen werden, denn die Energiedichte im stationären Fall ist entsprechend dem Energieverbrauch der Decke kleiner, als wenn die Wand starr wäre. In der Mehrzahl der Fälle sind aber die mitschwingenden Decken, Wände, Fußbelege u. dgl. stärker gedämpft als der Raum; dann wirken sie sowohl im stationären Fall energieverzehrend, als auch nachhallverkürzend. — Seltener machen sich die Eigenfrequenzen des Luftweges in den Räumen selbst geltend. Meist liegen diese im hörbaren Bereich bereits so dicht, daß sie nicht mehr getrennt wahrgenommen werden, wenn sie trotzdem auffallen, so müssen sie sehr wenig gedämpft sein und dadurch im stationären Zustand durch außerordentliche Tonverstärkung auffallen. Sie können auftreten in kleinen Sprechräumen und sie dürften häufig auftreten in den Wohnräumen der Rundfunkhörer. — Es folgt eine Einzelbeschreibung verschiedener Senderäume, auf deren Wiedergabe hier verzichtet sei. Es sei lediglich auf eine interessante Erfahrung eingegangen, die beim Bau von vier kleinen Senderäumen in London, Maida Vale, gemacht wurde. Um den Einfluß der Raumform zu studieren, wurden einmal zwei Räume von gleicher Nachhallzeit und gleichen Volumen gebaut, von denen der eine rechteckig, der andere schiefwinklig im Grundriß war. Nach Ansicht der Verfasser konnte im praktischen Gebrauch kein Unterschied in ihrer Eignung festgestellt werden. Wohl können bei rechteckigen Räumen durch Klatschen Flatterechos zwischen gegenüberliegenden kahlen Wänden erzeugt werden, doch spielt diese Erscheinung bei der praktischen Verwendung der Räume kaum eine Rolle. Dagegen ergab sich ein bemerkenswerter Unterschied beim Vergleich zweier ebenfalls nach Volumen und Nachhallzeit gleich gebauten, im wesentlichen rechtwinkligen Räume, von denen der eine eine glatte Oberfläche, der andere eine zackenförmige Oberfläche besaß, bei welcher der Zackenabstand längs der Wand überdies geändert wurde. Obschon mit der objektiven Methode der Nachhallmessung kein Unterschied in den Frequenzgängen zwischen beiden Räumen nachgewiesen werden konnte, wurde subjektiv der Raum mit der zackigen Oberfläche als weniger hallend empfunden und zwar sowohl für unmittelbares Abhören wie für das Abhören über Mikrophon und Lautsprecher. Für Orchesterdarbietungen erwies sich dieser z. B. als zu tot, für ausgesprochene Militärkapellen, für welche man kürzere Nachhallzeiten bevorzugt, erschien er geeignet. Die Verfasser vermuten auch hier, daß die verschiedene Wirkung der Zackenoberfläche gegenüber tiefen und hohen Tönen wesentlich an diesem subjektiven Eindruck beteiligt ist. (Leider ist es bisher nicht möglich, diese Empfindung durch irgendein objektives Maß, auch nicht durch die von OLSEN eingeführte Hallwirkung, d. i. Summe alles reflektierten Schalles zum direkten, zu beschreiben.)

L. CREMER

C. K. STEDMAN, **Ein Verfahren zur Prüfung von Lautsprechern** (J. acoust. Soc. Amer. 7 [1936], S. 265).

Wege zur Bestimmung der akustisch abgestrahlten Leistung eines Telefons aus rein elektrischen Messungen an den Telefonklemmen wurden bereits vor langer Zeit von HAHNEMANN und HECHT einerseits sowie KENNELLY und KOROKAWA andererseits angegeben. In neuerer Zeit ist ein auf ähnlicher Grundlage beruhendes Verfahren von FAY und HALL[1]) mitgeteilt worden, das sich auch auf Lautsprecher anwenden läßt. Dieses Verfahren unterzieht STEDMAN einer Prüfung, die zu einigen Richtigstellungen und Verallgemeinerungen führt.

Zur Untersuchung eines Lautsprechers wird dessen Trichter bzw. Konus entfernt und durch eine Luftsäule von bestimmter Höhe ersetzt. Ist die elektrische Impedanz für eine bestimmte Frequenz vor und nach der Auswechselung dieselbe, dann kann die akustische Impedanz des Trichters bzw. des Konus aus den Abmessungen der gleichwertigen Luftsäule berechnet werden. Besonders zu berücksichtigen ist hierbei der Einfluß des Kopplungsraumes zwischen der Membran und der akustischen Leitung. Auf diesem Wege läßt sich außerdem die abgestrahlte akustische Leistung des Lautsprechers bestimmen. Es wird ein Beispiel zur Erläuterung des Verfahrens angegeben. GEFFCKEN

[1]) J. acoust. Soc. Amer. 5 (1933), S. 46.

PATENTSCHAU

Bearbeitet von Heinrich Kösters

In der Patentschau erscheinen laufend Auszüge aus den wichtigsten in- und ausländischen Patenten, soweit sie die Akustik und ihre Nachbargebiete betreffen. Die Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

1.

Deutsches Patent Nr. 625530, patentiert ab 7. 3. 34, ausgegeben am 11. 2. 36

Dr. Georg Hofbauer in Wien

Verfahren zur Messung der Schalldämmung von Wänden od. dgl.

Die Messung der Schalldämmung von Wänden od. dgl. soll auf folgendem Wege erfolgen: Auf der einen Seite der Wand wird ein elektrisch betriebener Tonsender (Lautsprecher, Hupe od. dgl.) aufgestellt, dessen Lautstärke durch einen an der anderen Seite der Wand befindlichen Vorschaltwiderstand geregelt werden kann. Wird jetzt die Lautstärke des Schalles soweit vermindert, daß der Schall jenseits der Wand gerade eben unhörbar ist, so kann die Widerstandsänderung als Maß für die gesuchte Schalldämmung benutzt werden.

2.

Deutsches Patent Nr. 627127, patentiert ab 3. 3. 32, ausgegeben am 9. 3. 33

Klangfilm GmbH. in Berlin

Vorrichtung zur Erzielung einer Nachhallwirkung

Die Nachhallzeit eines normalen Aufnahmeraumes für Tonfilm zeigt in den meisten Fällen einen starken Frequenzgang. Durch Einschalten geeigneter Kettenleiter verschiedener Phasenlaufzeit (Drosselkette und Kondensatorkette) kann erreicht werden, daß die Nachhallwirkung des ganzen Systems praktisch von der Frequenz unabhängig ist, oder nach tiefen Frequenzen abnimmt. Die Wirkung einer solchen Einrichtung ist in Abb. 1 dargestellt. Es bedeuten:

a = Nachhallkurve des Raumes;
b = „Nachhall"kurve der Drosselkette;
c = „Nachhall"kurve der Kondensatorkette;
d = resultierende Nachhallkurve.

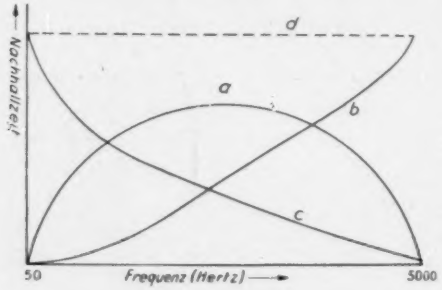

Abb. 1

3.

Deutsches Patent Nr. 628578, patentiert ab 4. 2. 32, ausgegeben am 7. 4. 36

Dr.-Ing. Friedrich Trautwein

Vorrichtung zur Erzeugung von glockenähnlichen Klängen

Die beschriebene Vorrichtung ist im wesentlichen als Ersatz für Kirchengeläute gedacht. Der Hauptwert wird auf getreue Nachahmung des Geläutes, sowie auf billige Erzeugung der notwendigen großen Schalleistungen gelegt.

Der Strom eines Generators sehr tiefer Frequenz (etwa 10 Hz) wird durch einen Transformator mit übersättigtem Eisenkern oder durch ähnliche Verfahren stark verzerrt. Aus der großen Zahl der so erhaltenen Obertöne, die außerordentlich dicht beieinander liegen, werden die für die Synthese des Glockenklanges notwendigen herausgefiltert.

Um den plötzlichen Anstieg und langsamen Abfall der Lautstärke beim Anschlagen des Klöppels nachzubilden, ist vorgesehen, eine Metalldrahtlampe als Vorschaltwiderstand zu benutzen, deren Widerstand im kalten Zustand sehr klein ist (schneller Stromanstieg beim Einschalten) und mit steigender Erwärmung langsam zunimmt. Außerdem kann der Rhythmus des Geläutes durch von einem Motor gesteuerte Widerstände erzeugt werden. Die Lautstärkeregelung kann hierbei für die einzelnen Teiltöne — entsprechend den verschiedenen Abklingzeiten — verschieden sein.

Für den Betrieb dieser Einrichtung ist nur ein einziger Tieffrequenzgenerator notwendig. Die Vermeidung von Röhrengeneratoren und Kippgeräten soll das Verfahren besonders billig gestalten.

4.

Deutsches Patent Nr. 631724, patentiert ab 11. 2. 24, ausgegeben am 1. 3. 36

Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin

Trichterloser Lautsprecher mit Schallwand

Von der Anmeldung dieses Patentes bis zur Erteilung sind zwölf Jahre vergangen. Ein Zeichen dafür, daß um dieses Patent (Rice-Kellogg-Lautsprecher) hart gekämpft wurde, was in Anbetracht seiner Bedeutung nicht verwunderlich ist. Das Patent enthält die grundlegenden Bedingungen für den Aufbau eines Lautsprechers mit Schallwand, der auch tiefe Frequenzen mit genügender Leistung abstrahlt.

Von den insgesamt 15 Ansprüchen sei hier der erste wörtlich wiedergegeben.

Patentanspruch:

1. Trichterloser Lautsprecher mit Schallwand dadurch gekennzeichnet, daß eine nicht ebene, vorzugsweise konische, durch allseitig nachgiebige Halterung auf eine unterhalb der niedrigsten wesentlichen Sprachfrequenzen (etwa 100 Hz) liegende abgestimmte Membran an oder nahe der Schallwand angeordnet und diese so bemessen ist, daß der akustische Kurzschluß der abzustrahlenden tiefen Frequenzen vermieden ist.

2.—14. Die weiteren Ansprüche enthalten noch besondere Ausführungsformen, wie Halterung der Membran in Gummi oder Tuch, günstigster Konuswinkel u. ä.

5.

Deutsches Patent Nr. 629650, patentiert ab 23. 9. 25, ausgegeben am 14. 5. 36

Tobis Tonbild-Syndikat AG. in Berlin

Verfahren zur künstlichen Erzeugung einer Raumtonwirkung für die Zwecke des Tonfilms

Die Wiedergabe von Lichttonaufnahmen, die gegeneinander eine Phasenverschiebung von $^1/_8$—$^1/_{30}$ Sek. haben, soll nach dem Patentanspruch durch eine einzige Photozelle erfolgen. Die Herstellung der phasenverschobenen Lichttonaufzeichnung erfolgt z. B. durch mehrmaliges verschobenes Kopieren des Lichttonträgers auf ein und denselben Film. Nach einem weiteren Vorschlag wird das Abtastlicht an mehreren Stellen durch den Film geschickt, bevor es auf die Photozelle trifft.

6.

Britisches Patent Nr. 440191, patentiert ab 23. 6. 34, ausgegeben am 23. 12. 35

General Electric Co.

Schaltung für Lautsprecher

Zur Vermeidung des Nadelgeräusches, insbesonders bei kleinen Lautstärken, wird in den Lautsprecherstromkreis (Abb. 2) ein Sperrkreis

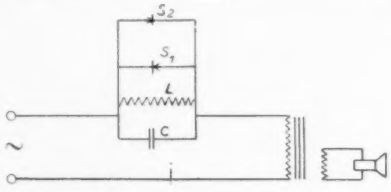

Abb. 2

(L, C) für etwa 5000 Hz gelegt, dem ein amplituden-abhängiger Widerstand parallel geschaltet ist. Als Widerstand dienen zwei richtungsvertauschte Kupferoxydgleichrichter (S_1, S_2) oder zwei andere Gleichrichter mit ähnlichen Kennlinien. Der Wechselstromwiderstand dieses Parallel-Systems nimmt bei steigender Spannung ab, so daß die Wirkung des Sperrkreises bei kleinen Lautstärken groß ist und die hohen Frequenzen stark geschwächt werden, während bei großen Lautstärken seine Wirkung wegen des kleinen Parallelwiderstandes gering ist.

7.

Deutsches Patent Nr. 630897, patentiert ab 8. 12. 31, ausgegeben am 8. 6. 36

Echometer GmbH. in Kiel

Schallsender zur Erzeugung hoher Töne von großer Anfangsamplitude und kurzer Dauer

Für Echolotungen werden in den meisten Fällen Sinustöne verwandt, da es auf diese Weise möglich ist, Resonanzeigenschaften von Sendern und Empfängern auszunützen, und so

große Empfindlichkeit bei kleinem Aufwand zu erzielen. Bei sehr kurzen Echozeiten stört jedoch die lange Einschwingzeit der üblichen Sender, weil zur genauen Abmessung der Zeitdifferenzen scharfe Einsätze der Signale nötig sind.

Gemäß der Erfindung wird der Ton durch eine Pfeife erzeugt, die unmittelbar an eine Explosionskammer angeschlossen ist. Hierdurch wird erreicht, daß der Ton sofort mit voller Amplitude einsetzt.

NACHRICHTEN

Für das Jahr 1936 hatte die Preußische Akademie der Wissenschaften Berlin folgende akustische Preisaufgabe gestellt:

„Die physikalischen Bestimmungsgrößen der Klangfarbe von Saiteninstrumenten sind durch Versuche festzustellen.

Es ist bekannt, daß der Klangeindruck der Saiteninstrumente nicht nur von der Stärke der Teiltöne, sondern auch von ihrem zeitlichen Verlauf abhängt. Zur weiteren physikalischen Klärung der hier obwaltenden Verhältnisse ist es erwünscht, systematisch zu untersuchen, wie diese Bestimmungsgrößen mit der Bauart der Instrumente zusammenhängen."

In der diesjährigen Leibniz-Sitzung der Akademie am 2. Juli d. Js. wurde als Preisträger Dr. H. Meinel aus Markneukirchen verkündet. Das Urteil der Akademie über seine Arbeit lautet:[1])

Der Verfasser der Arbeit mit dem Kennwort „Linarolo" hat sich in erster Linie das sehr wichtige, wenn auch die Preisaufgabe nicht erschöpfende Ziel gesetzt, Resonanzverhältnisse, Klang und zweckmäßigste Holzdicke der Geigenkörper zu untersuchen, um ihre Klangschönheit derjenigen der besten, künstlerisch anerkannten Geigenformen anzugleichen. Der Einfluß der Stärke des Holzes wurde systematisch in der Weise untersucht, daß eine Geige aus übernormal starkem Holz durch fortgesetzte Bearbeitung nach verschiedenen Gesichtspunkten hin auf immer kleinere Holzdicken gebracht wurde. Die Geige wurde in allen ihren Bearbeitungsstufen künstlerisch und physikalisch untersucht, letzteres besonders mit Hilfe der bekannten Grützmacherschen Suchtonmethode. An den erzielten Ergebnissen wird der Physiker wie der Künstler gleiches Interesse nehmen.

[1]) Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften Juli 1936.

Ferner werden die wichtigsten Resonanzgebiete der Geigenkörper festgestellt; sie bestimmen die Stärke der Grundtöne, die nach dem Verfasser für die Klangschönheit entscheidend ist.

Den Einfluß der Lackierung und des Einspielens findet der Verfasser nicht so sehr groß, wie vielfach angenommen wird.

Es liegt hier eine so sorgfältige, vielseitige und wertvolle Arbeit vor, daß ihr unter den eingereichten preisfähigen Schriften der (nicht teilbare) Preis zuzuerkennen ist.

Die Akustische Zeitschrift wird in einer ihrer nächsten Hefte die wesentlichen Teile der Preisarbeit sowie einen Bericht über die neueren Untersuchungen des Verfassers an Geigen bringen.

Prof. Dr. Erwin Meyer ist von der Acoustical Society of America eingeladen worden, auf ihrer diesjährigen Jahrestagung, die zusammen mit der Physikalischen Gesellschaft Amerikas in New York vom 29.—31. Oktober abgehalten wird, Vorträge über Schwingungsprobleme und Raumakustik zu halten.

Geheimrat Prof. Dr. Walter König, der frühere Direktor des Physikalischen Instituts an der Universität Gießen ist im 77. Lebensjahr gestorben. Prof. König hat sich hauptsächlich mit hydrodynamisch akustischen Untersuchungen beschäftigt. Auf akustischem Gebiet ist besonders seine Theorie zur Wirkungsweise der Rayleighschen Scheibe[1]) bekannt geworden. Die hier abgeleitete Formel hat sich in neuer Zeit gut bestätigt, obwohl sie einige im Experiment nicht vorhandene Voraussetzungen (ideale inkompressible Flüßigkeit) macht. Die Königsche Formel wird allen Schalleichungen mit der Rayleighschen Scheibe zugrunde gelegt.

[1]) W. König, Wied. Ann. 43 (1881), S. 43.

Verantwortlicher Schriftleiter: Reg.-Rat Dr. Martin Grützmacher, Berlin. — Für den Anzeigenteil verantwortlich: A. Plohmann, Leipzig. — Verlag von S. Hirzel in Leipzig, Königstr. 2. — Druck: A. Heine, G. m. b. H. Gräfenhainichen. — Auflage dieses Heftes 5000. — Zur Zeit gilt Anzeigenpreisliste 1. — Printed in Germany